Q
33
A6X
NH

ANALES

DE LA

SOCIEDAD CIENTIFICA ARGENTINA

Director: Cap. de Navío (R.) EMILIO L. DIAZ

SEPTIEMBRE-OCTUBRE 1968 — Entregas III-IV — TOMO CLXXXVI

SUMARIO

BUENOS AIRES
Avda. Santa Fe 1145

1968



SOCIEDAD CIENTIFICA ARGENTINA

SOCIOS HONORARIOS

Ing. Enrique Butty
Dr. Bernardo A. Houssay
Dr. Selman Waksman
Dr. Florentino Ameghino †
Dr. Valentín Balbín †
Ing. Santiago E. Barabino †
Dr. Carlos Berg †
Dr. Germán Burmeister †
Ing. Vicente Castro †
Ing. Enrique Chanourdie †
Dr. Carlos Darwin †
Dr. Alberto Einstein †
Dr. Enrique Ferri †
Dr. Angel Gallardo †
Dr. Benjamín A. Gould †
Dr. Cristóbal M. Hicken †
Dr. Eduardo L. Holmberg †
Ing. Luis A. Huergo †
Ing. Eduardo Huergo †
Dr. Mario Isola †
Dr. Juan J. J. Kyle †
Dr. César Lombroso †
Ing. Guillermo Marconi †
Dr. J. Mendizábal Tamborel
Dr. Walter Nernst †
Dr. R. A. Phillippi †
Dr. Guillermo Rawson †
Dr. Alfredo Sordelli †
Dr. Carlos Spegazzini †
Dr. Pedro Visca †
Dr. Estanislao S. Zeballos †

JUNTA DIRECTIVA
(1966-1967)

Presidente........ Ing. José S. Gandolfo
Vicepresidente 1º........ Dr. César A. de la Vega
Vicepresidente 2º........ Dr. Roberto F. Recoder
Secretario........ Ing. Agr. Eduardo Pous Peña
Prosecretario........ Dr. Aldo R. J. Paoli
Tesorero........ Agrim. Antonio M. Saralegui
Bibliotecario........ Dr. Horacio H. Camacho
Vocales Titulares : Ing. Agr. Santiago Boaglio
Ing. Agr. Juan J. Burgos
Ing. Nicolás Konzewitsch
Dr. Martiniano Leguizamón Pondal
Ing. Sigfrido Lichtenthal
Ing. Carlos A. J. Mari
Dr. Alfredo Pavlovsky
Ing. Alberto Bilotti
Vocales Suplentes. Ing. Eduardo Braun Cantilo
Dr. Benito S. Colqui
Dr. Fernando D. Díaz Solá
Ing. Andrés E. Garlan
Dr. Jorge R. A. Vanossi

SECCIONES DEL INTERIOR
Comisión Directiva

San Juan

Presidente
Doctor Indalecio Carmona Ríos
Vicepresidente
Ingeniero Fernando Volponi
Secretario
Doctor Pablo A. Del Carril
Tesorero
Cont. Púb. Duilio S. Graffigna
Vocales
Ingeniero Ramón Ruiz Bates
Ingeniero Federico Rocha
Doctor Antonio Aguilar

Santa Fe

Presidente
Dr. Argentino A. Bonetto
Vicepresidente
Dr. Ezio Emiliani
Secretario
Prof. Clarice T. Pignalberi
Tesorero
Ing. Quím. Enrique A. Virasoro
Vocales
Ing. Quím. Guillermo Berraz
Ing. José M. Parera

ADVERTENCIA. — Los colaboradores de los Anales son personalmente responsables de la tesis sustentada en sus escritos. Los que deseen tirada aparte de 50 ejemplares de sus artículos, deben solicitarla por escrito. Art. 10 del Reglamento de los « ANALES » (modificado por la J. D. en su sesión de fecha 4 de Septiembre de 1941). Los escritos originales destinados a la Dirección de los « Anales », serán remitidos a la Gerencia de la Sociedad, Avenida Santa Fe 1145, a los efectos de registrar la fecha de entrega para luego enviarlos al señor Director.

Impreso en Imprenta Coni - Perú 684 - Buenos Aires - República Argentina

SERIE I, CIENCIAS, N° 16

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL CRECIMIENTO DE CULTIVOS PUROS Y MIXTOS DE « EUGLENA GRACILIS » Y « TETRAHYMENA PYRIFORMIS »

Por BEATRIZ DIMANT [1], SILVIA L. VALENTINUZZI [2] y CRISTINA WISNIVESKY [3]

RESUMEN

Este trabajo tiene por objeto presentar observaciones sobre diferencias en el desarrollo de cultivos de dos especies de organismos que coexisten en un mismo medio. Los experimentos comprenden : a) Estudio de un factor físico limitante sobre los organismos. b) Estudio de la competencia interespecífica. c). Acción conjunta de la competencia y el factor limitante. Las especies utilizadas fueron *Euglena gracilis* y *Tetrahymena pyriformis*.

SUMMARY

The purpose of this paper is to present some experimental results observed in the development of two protozoan species coexisting in the same culture. The experiments included the following studies : a) effects of a limiting factor on one of the species ; b) competition between species ; c) jcined effects of the limiting factor and competition. The experiments were carried out using *Euglena gracilis and Tetrahymena pyriformis*.

1. INTRODUCCION

Por *competencia interespecífica* (Ref. 1) se entenderá cualquier interacción entre dos o más poblaciones de especies que afecte adversamente su crecimiento. En términos experimentales puede afirmarse que existe alguna forma de competencia cuando las curvas de crecimiento de dos poblaciones solas tienen una derivada mayor que cuando coexisten en el mismo medio.

[1] Actualmente becaria interna del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Bs As.

[2] Actualmente en el Departamento de Agronomía e Instituto Oceanográfico, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Bs. As.

[3] Actualmente en el Centro Panamericano de Zoonosis, Oficina Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud, CC 23, Ramos Mejía, Bs. As.

SMITHSONIAN INSTITUTION MAR 24 1969

La supervivencia de un organismo o un grupo de organismos depende de un complejo de condiciones. Por *factor limitante* se entenderá una condición que se aproxima o excede el límite de tolerancia.

Gross y Jahn (Refs. [2, 3]) han investigado la influencia de la luz y temperatura sobre el crecimiento de *Euglena gracilis* y *Tetrahymena pyriformis*.

Los experimentos que se describen tuvieron por objeto determinar la existencia de competencia interespecífica en cultivos mixtos de dichas especies y verificar la influencia de la luz como factor limitante a temperatura aproximadamente constante (25,5° C), tanto en cultivos puros como en cultivos mixtos.

2. METODO DE TRABAJO

2.1. *Siembra.* Se coloca el medio de cultivo y el inóculo en tubos de ensayo esterilizados, siguiendo la técnica microbiológica habitual.

2.2. *Cálculo de concentración.* La muestra para realizar el contaje se toma de la parte superior del cultivo, agitando con la pipeta para homogeneizarlo. Para el contaje (Ref. [4]) se utiliza la cámara de Neubauer. Las sucesivas concentraciones porcentuales referidas a la inicial se calculan mediante:

$$C_i \% = 100\, C_i/C_o = 100\, n_i/n_o$$

donde:

n_i = contaje de orden i

n_o = contaje inicial.

2.3. *Cálculo de los tiempos de generación.* Teniendo en cuenta que C_o es la concentración inicial de protozoarios y que se dividen por bipartición, en la generación v se tendrá una concentración C_v:

$$C_v = C_o . 2^v$$

Si llamamos t al tiempo necesario para que ocurran las v generaciones, se denomina *tiempo de generación* T a

$$T = t/v$$

Ahora estamos en condiciones de expresar la ley de crecimiento en la siguiente forma:

$$C_v = C_o . 2^{t/T}$$

Tomando logaritmos obtenemos

$$\log C_v = \log C_o + (t/T) \log 2$$

Esta es la ecuación de una recta que también se puede escribir

$$m = a_o + a_1 t$$

donde

$$a_1 = (\log 2)/T$$

y por lo tanto

$$T = (\log 2)/a_1$$

Para p observaciones a intervalos t_i se demuestra (Ref. [5]) que:

$$p\, a_o + a_1 \Sigma t_i = \Sigma m_i$$
$$a_o \Sigma t_i + a_1 \Sigma t_i^2 = \Sigma m_i t_i$$

sistemas de incógnitas a_o y a_1, que representan la ordenada al origen y la pendiente, respectivamente, de la recta de regresión mínimo cuadrática.

Despejando se obtiene

$$a_o = (\Sigma m_1 - a_i \Sigma t_i)/p$$
$$a_1 = (p \Sigma m_i t_i - \Sigma t_i \Sigma m_i) / (p \Sigma t_i^2 - (\Sigma t_i)^2)$$

Esta última permite calcular el tiempo de generación promedio.

3. MATERIAL UTILIZADO

3.1. *Cepas. Euglena gracilis Z.* y *Tetrahymena pyriformis H.S.*

3.2. *Medio de cultivo.* Proteasa peptona: 2,5 g/l; Triptona: 2,5 g/l; Acetato de sodio con tres moléculas de agua de cristalización: 1,0 g/l; Dextrosa: 1,0 g/l; Fosfato monoácido de potasio: 1,0 g/l; Sulfato de magnesio con siete moléculas de agua de cristalización: 0,1 g/l; Extracto de levadura: 0,1 g/l; Clorhidrato de tiamina: 0,002 g/l.

3.3. *Otros elementos.* Estufa para cultivos en la oscuridad. Estufa para cultivos en la luz (provista de un tubo fluorescente). Mi-

croscopio. Cámara de Neubauer. Tubos de ensayo. Pipetas graduadas y pipetas Pasteur.

4. EXPERIMENTOS REALIZADOS

4.1. *Experimentos en la oscuridad.* Se desarrollaron durante 96 horas consecutivas. En seis tubos de ensayo se colocaron 9 cm^3 de medio de cultivo por tubo y se sembraron de la siguiente manera:

1) Dos tubos con 0,5 cm^3 de cultivo puro de *E. gracilis.*
2) Dos tubos con 0,5 cm^3 de cultivo puro de *T. pyriformis.*
3) Dos tubos con 0,5 cm^3 de cultivo de *E. gracilis* y 0,5 cm^3 de cultivo puro de *T. pyriformis.*

Los seis tubos fueron colocados en la estufa. Diariamente se midió la temperatura, al comienzo y al final del día, registrándose temperaturas extremos de 26,5° C y 23,5° C, con una media de aproximadamente 25° C.

4.2. *Experimentos en la luz.* Tuvieron una duración de 91 horas. Se colocó el medio de cultivo y el inóculo en forma idéntica a la realizada en el experimento anterior, excepto que la estufa estaba iluminada. Las temperaturas extremas registradas fueron 28° C y 23,5° C, con una media de 25,8°C.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. En la tabla I se consignan las concentraciones porcentuales medias de *E. gracilis* y *T. pyriformis* en cultivos puros y mixtos correspondientes a la experiencia en la oscuriad (4.1.). En la figura 1 se representan las curvas de crecimiento de *T. pyriformis* en cultivo puro y en cultivo mixto. En la figura 2 se representan las mismas curvas para *E. gracilis.*

En la tabla II se consignan las concentraciones porcentuales medias de *E. gracilis* y *T. pyriformis* en cultivos puros y mixtos correspondientes a la experiencia en la luz (4.2). Las figuras 3 y 4 representan las curvas de crecimiento en cultivo puro y en cultivo mixto de las especies *T. pyriformis* y *E. gracilis,* respectivamente.

En todos los casos, tanto la ordenada al origen como la pendiente se calcularon con el método de regresión cuadrática mencionado

TABLA I
(oscuridad)

Horas	Concentraciones medias en °/o			
	Cultivos puros		Cultivos mixtos	
	E. gracilis	*T. pyriformis*	*E. gracilis*	*T. pyriformis*
0.........	100	100	100	100
21.........	320	1720	312	1916
48.........	2340	5620	250	5933
72.........	4240	5000	187	7350
96.........	10000	6120	62	7166

TABLA II
(luz)

Horas	Concentraciones medias en °/o			
	Cultivos puros		Cultivos mixtos	
	E. gracilis	*T. pyriformis*	*E. gracilis*	*T. pyriformis*
0.........	100	100	100	100
18.........	110	375	244	76
42.........	415	150	1169	71
66.........	1705	—	2931	12
91.........	3783	275	4731	29

TABLA III

Cultivo	Tiempo de generación T (hs)			
	En la oscuridad		Con luz	
	E. gracilis	*T. pyriformis*	*E. gracilis*	*T. pyriformis*
Puro.......	15	18,8	15	»15
Mixto......	»15	15	15	»15

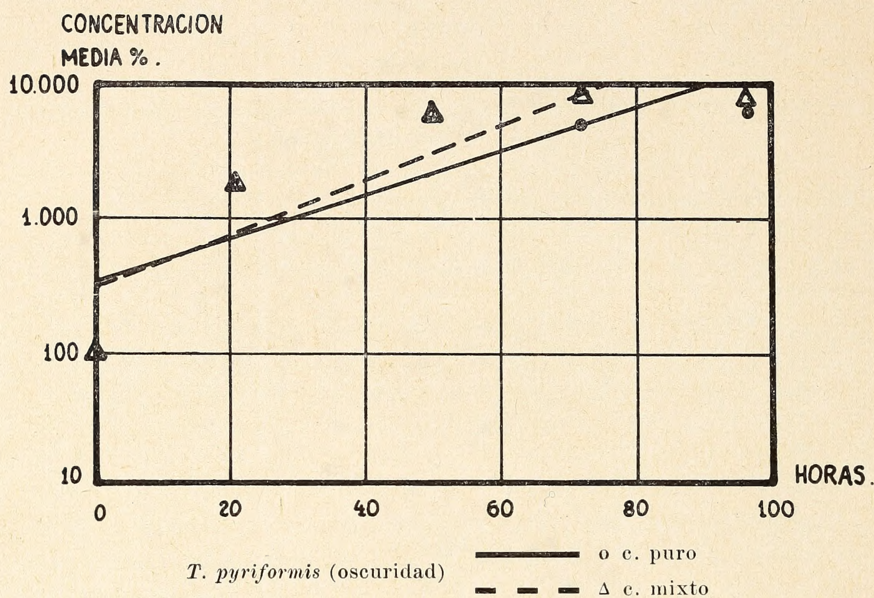


Figura 1

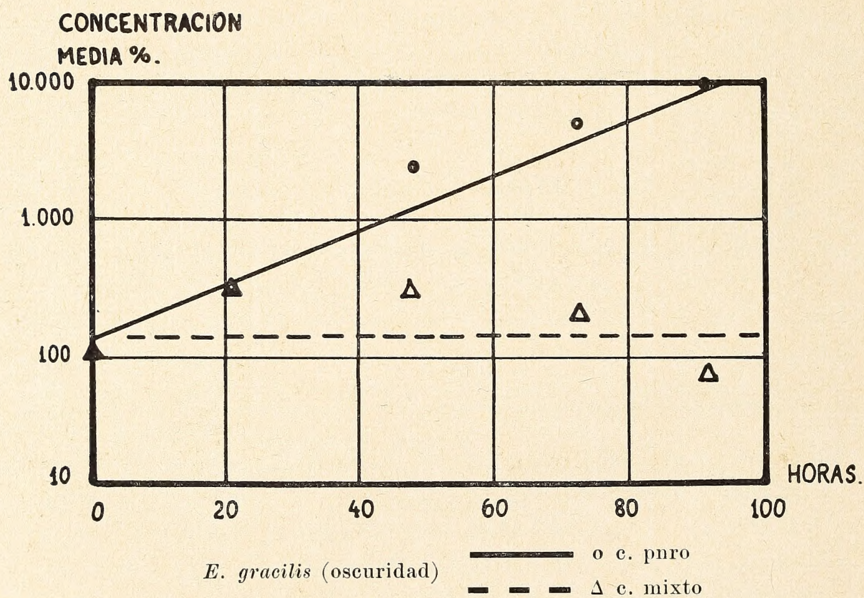
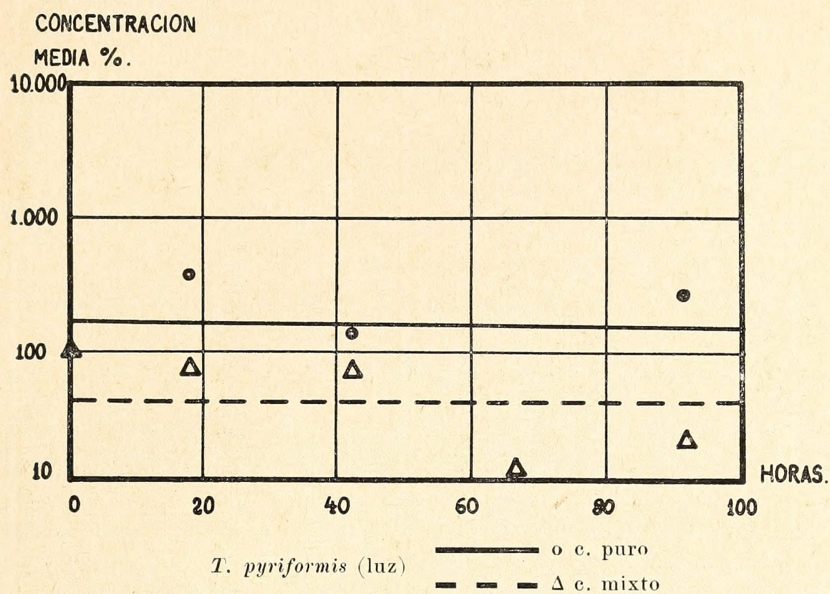
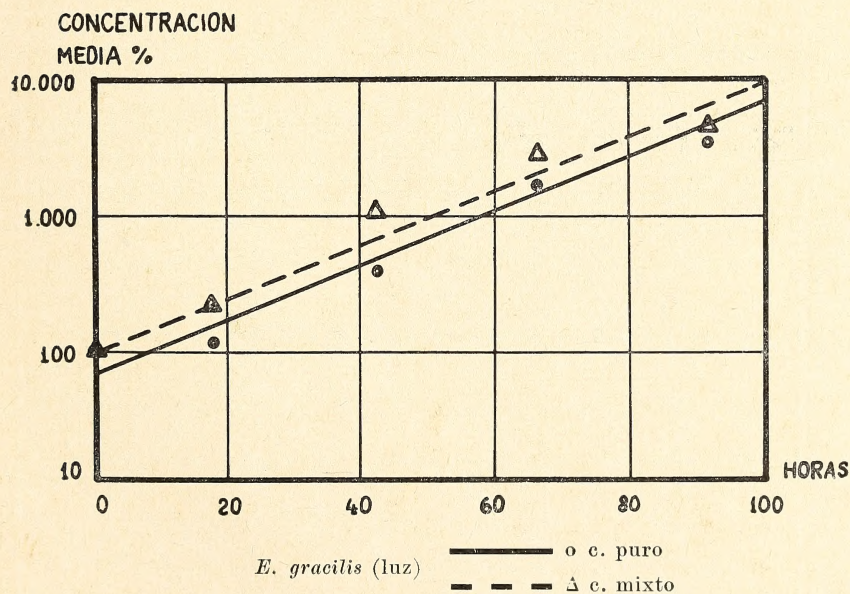


Figura 2



T. pyriformis (luz) o c. puro, Δ c. mixto

Figura 3



E. gracilis (luz) o c. puro, Δ c. mixto

Figura 4

en 2.3. Para facilidad de presentación todos los gráficos son semilogarítmicos. Las concentraciones iniciales medias variaron entre 1300 y 6500 protozoriarios por cm^3 en los diversos experimentos.

En la tabla III se consignan los tiempos de generación calculados a partir de los datos de las tablas I y III, mediante aplicación de la expresión final de 2.3.

En virtud del método estadístico utilizado para su determinación, estos tiempos representan en realidad los tiempos necesarios para que las respectivas poblaciones se dupliquen. Esta interpretación física parece adecuada a la naturaleza ecológica de los experimentos.

5.2. *Crecimiento en la oscuridad*

T. pyriformis: Se desarrolló bien tanto en el cultivo puro como en el mixto, con tiempos de generación del mismo orden (18,8 hs y 15 hs).

E. gracilis: En cultivo puro creció con un tiempo de generación de 15 hs., sin coloración debido a la ausencia de fotosíntesis. En el cultivo mixto su tiempo de generación fue mucho mayor, notándose la presencia de Euglenas deformadas y con un tamaño inferior al normal.

5.3. *Crecimiento en la luz*

T. pyriformis: Tanto en el cultivo puro como en el mixto, la especie no se desarrolló y decayó gradualmente hasta registrar algunos contajes de cero.

E. gracilis: Esta especie dio tiempos de generación similares (15 horas) en ambos cultivos.

6. CONCLUSIONES

De los resultados anteriores y de su discusión podemos concluir:

1) En la oscuridad, los cultivos puros se desarrollan con tiempos de generación del mismo orden.

2) En la oscuridad y en cultivos mixtos parece haber competencia interespecífica que resulta detrimental para *E. gracilis* cuya población permanece estacionaria. *T. pyriformis* no parece afectada y se computa un tiempo de generación semejante al del cultivo puro.

3) En la luz, el cultivo puro de *E. gracilis* dio un tiempo de generación similar al del experimento en la oscuridad. En cambio en el caso de *T. pyriformis* la luz es un factor limitante de características tan importantes que la población decae.

4) En la luz y en cultivos mixtos ambas especies se desarrollan con tiempos de generación aproximadamente iguales a los respectivos tiempos en cultivos puros. La luz es un factor limitante sobre la población de *T. pyriformis* de influencia tan predominante que anula su crecimiento y no da lugar a la existencia de una eventual competencia interespecífica. Este experimento se prolongó durante cinco días más a partir del último tiempo consignado en la tabla II. Al cabo de este período se notó una disminución en la concentración de *E. gracilis,* correlacionada con un inusitado aumento en la concentración de la otra especie. El hecho de que *E. gracilis* haya tomado una coloración verde intensa permite suponer la existencia de un efecto de sombra que protegió el desarrollo de *T. pyriformis*, la cual a su vez actuó en detrimento de la otra especie. Este podría ser un sistema biológico con realimentación que, en opinión de las autoras, merece un estudio más detallado.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado en el ex-Laboratorio de Magnetobiología del Instituto Nacional de Microbiología "Carlos G. Malbrán", Bs. As. El Dr. M. Valentinuzzi, jefe de dicho laboratorio, facilitó la utilización del mismo para efectuar el trabajo y realizó importantes sugerencias sobre el mismo. El Dr. O. Pearson, profesor contratado de Ecología en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de Bs. As. alentó su realización y presentación. Las cepas puras de *E. gracilis* y *T. pyriformis* provenían de una donación realizada por el Dr. J. A. Gross del Illinois Institute of Technology, Chicago, EE. UU.

Las autoras se complacen en dejar constancia de todos estos hechos y de su agradecimiento a las personas e instituciones involucradas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Odum, E. P., 1963 : « Fundamentals of Ecology », W. Saunders & Co, Philadelphia, EEUU.
2. Gross, J. A. and T. L. Jahn, 1962 : « Cellular responses to thermal and photo stress, I. *Euglena* and *Chlamydomona* », The Journal of Protozoology, *9*, 3, pp. 340-346.
3. Gross, J. A., 1962 : « Cellular responses to thermal and photo stress, II. Chlorotic Euglenids and *Tetrahymena* », The Journal of Protozoology, *9*, 4, pp. 415-418.
4. Valentinuzzi, M. y T. Vázquez, 1967 : « Desarrollo de cultivos de *Tetrahymena pyriformis* en el campo magnético estático homogéneo », Anales de la Sociedad Científica Argentina, Enero-Febrero 1968, *CLXXXV*, N° 14, pp. 3-30.
5. Cramer, H., 1960 : « The elements of probability theory », J. Wiley & Sons, New Pork, EEUU.

SERIE I, CIENCIAS: Nº 16

PARADOJAS RELATIVISTAS DE LAS FUERZAS

POR HERMAN ELIGES

RESUMEN

La aplicación de la teoría de la relatividad al estudio de las fuerzas, conduce a otros enfoques de las mismas, lo que permite obtener resultados de interés para la mecánica y la electrodinámica.

SUMMARY

The application of the theory of relativity to the study of forces, leads us to another outlook of such a subject, wich allows to obtain interesting results for Mechanics and Electrodynamics.

1. INTRODUCCION

El estudio de las fuerzas en la física clásica no generaba ambigüedades en la mecánica. No sucedía lo mismo en la electrodinámica, donde dos leyes elementales fueron formuladas; las de Grassmann y de Ampere. Ambas conducían al mismo resultado para los circuitos cerrados; en cambio, diferían fundamentalmente en un concepto básico, el principio de acción y reacción, al que sólo se ajustaba la ley de Ampere.

Posteriormente, con el fracaso del experimento de Trouton y Noble, aquella física resultó ser impotente para explicar este sorprendente resultado.

Con el advenimiento de la teoría de la relatividad restringida, las fuerzas conducen a nuevas dificultades. No se cumple el principio de acción y reacción en la mecánica y en la electrodinámica y no rige la condición de los momentos para el equilibrio de los cuerpos.

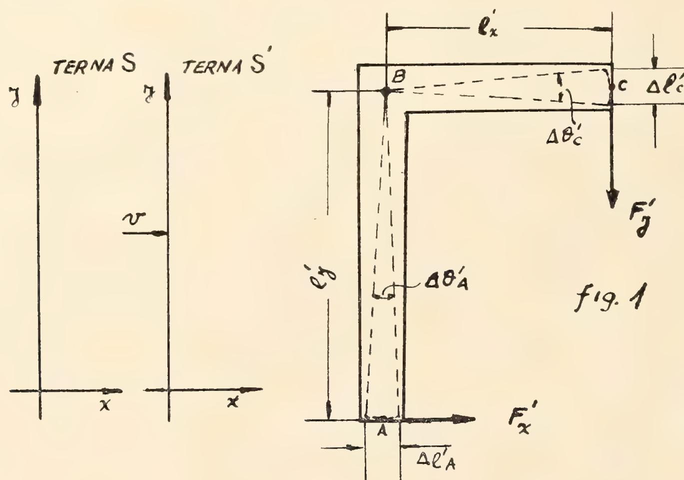
No obstante lo expresado precedentemente, la relatividad nos permite otros puntos de miras para el enfoque de las dificultades

señaladas, y encuentra explicaciones razonables para situaciones paradojales. Como consecuencia, en la mecánica, el principio de los trabajos virtuales se mantiene como una ley que permite explicar el equilibrio de los cuerpos en reemplazo de la condición de los momentos. Para la electrodinámica, la expresión relativista del campo eléctrico facilitó el descubrir una explicación de la ley de Ampere o de Grasmann en las interacciones entre elementos de corriente paralelos y enfrentados, sin hacer intervenir el tradicional concepto del magnetismo. Ello es de capital importancia por cuanto se ha abierto de esta forma el camino para comprender el significado de este fenómeno y a la vez, crear las bases para formular una nueva electrodinámica con sólo aplicar las leyes de la electrostática y de la relatividad.

2. LA FUERZA EN LA MECANICA

Con el traslado de sistemas inerciales, las fuerzas transversales, y las longitudes paralelas al movimiento sufren contracciones que alteran la magnitud e inclinación de las fuerzas resultantes. Ello genera una consecuencia paradójica: la cupla sin poder rotatorio, que ocasiona el incumplimiento de la condición de los momentos para el equilibrio y del principio de acción y reacción como sucede en los casos de la palanca acodada y en la barra en tracción respectivamente.

2.1. Palanca acodada



Sea la terna o sistema inercial S y uno S' que se desplaza a velocidad constante en dirección y sentido respecto al supuesto fijo S. Sus ejes serán paralelos y los correspondientes a x coincidentes con el vector velocidad $\vec{v}$.

Supongamos además las fuerzas y la longitud de los brazos desiguales en la terna S', respecto a la cual se halla fija la palanca. Para esta terna la condición de los momentos para el equilibrio, respecto del centro de giro B, es:

1) $$F'_x \cdot l'_y = F'_y \cdot l'_x$$

Visto el fenómeno desde S, las magnitudes anteriores valen:

$$F_x = F'_x$$

$$F_y = \frac{1}{\gamma_v} \cdot F'_y$$

$$l_x = \frac{1}{\gamma_v} \cdot l'_x$$

$$l_y = l'_y$$

$$\gamma_v = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

La suma de los momentos es:

2) $$F_x \cdot l_y - F_y \cdot l_x = Cr$$

Donde Cr es el remanente de la cupla que tendería a hacer girar a la palanca.

Reemplazando los valores anteriores en 2, se obtiene:

3) $$C_r = F'_x \cdot l'_y \cdot \beta^2 \quad \text{donde} \quad \beta = \frac{v}{C}$$

No obstante no anularse Cr, la palanca no gira, cumpliéndose la condición de los momentos sólo para la terna S'. Esta restricción conduce, según la relatividad, a afirmar que tal condición no puede ser una ley física general.

En reemplazo de la condición de los momentos, proponemos el empleo del principio de los trabajos virtuales, el que sí se verifica

como se verá, para cualquier sistema y puede ser considerado, en consecuencia, como una ley física general.

Supongamos que el giro en B se realiza sin roces. Efectuemos entonces un pequeño giro virtual $\Delta\,\theta'$. Por aplicación del principio citado se tendrá:

4) $$F'_x \,.\, \Delta l'_A - F'_y \,.\, \Delta l'_C = 0$$

Siendo:

$$\Delta l'_C = l'_x \,.\, \Delta\theta'_C$$

$$\Delta l'_A = l'_y \,.\, \Delta\theta'_A$$

Por tratarse de un cuerpo supuesto rígido se cumple además:

$$\Delta\theta'_C = \Delta\theta'_A$$

Reemplazando estos valores en 4 queda:

5) $$F'_x \,.\, l'_y - F'_y \,.\, l'_x = 0$$

La verificación de 5, por la fórmula 1, nos demuestra el equilibrio de la palanca para la terna S'.

Para la terna S debe cumplirse:

6) $$F_x \,.\, \Delta l_A - F_y \,.\, \Delta l_C = 0$$

Siendo:

$$F_x = F'_x$$

$$F_y = \frac{1}{\gamma_v} \cdot F'_y$$

$$\Delta l_A = l_y \,.\, \Delta\theta_A = l'_y \,.\, \Delta\theta_A$$

$$\Delta l_C = l_x \,.\, \Delta\theta_C = \frac{1}{\gamma_v} \cdot l'_x \,.\, \Delta\theta_C$$

$$\Delta\theta_A = \frac{1}{\gamma_v} \cdot \Delta\theta'_A$$

$$\Delta\theta_C = \gamma_v \,.\, \Delta\theta'_C$$

Reemplazando estos valores en 6 queda:

7) $$F'_x \,.\, l'_y - F'_y \,.\, l'_x = 0$$

La verificación de 7 por la 1 nos demuestra que también la palanca se halla en equilibrio para la terna S.

Ahora puede apreciarse por qué no se cumple la condición de los momentos para la terna S. En efecto, reemplazando sólo F_x, F_y, Δl_A y Δl_C en la 6 se tiene:

$$F'_x \cdot l'_y \cdot \Delta\theta_A - \frac{1}{\gamma_v} \cdot F'_y \cdot \frac{1}{\gamma_v} \cdot l'_x \cdot \Delta\theta_C = 0$$

como por 1:

$$F'_x \cdot l'_y = F'_y \cdot l'_x$$

queda:

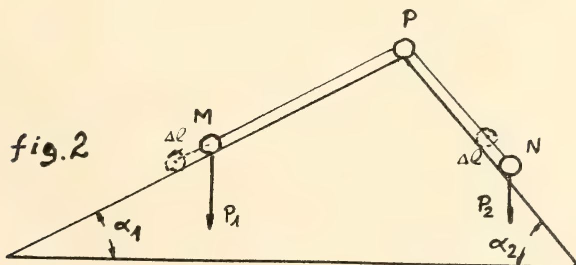
$$F'_x \cdot l'_y \left[\Delta\theta_A - \frac{1}{\gamma_v^2} \cdot \Delta\theta_C \right] = 0$$

Si suponemos $\Delta\theta_A = \Delta\theta_C$, la fórmula anterior vale:

$$F'_x \cdot l'_y \cdot \beta^2 = 0$$

Esto es un absurdo, puesto que el primer miembro es distinto de cero y es precisamente igual a la cupla rotatoria Cr dada por la fórmula 3. Este absurdo resulta de suponer que los ángulos vistos desde diferentes ternas no alteran su valor; lo que está en franca contradicción con los resultados relativistas. Entonces, la condición de los momentos no se cumple, pues la misma implica considerar invariables los ángulos para las diferentes ternas. Evidentemente se trata de una condición errónea y que sólo adquiere validez para la terna S', en donde precisamente sí se verifica que los ángulos virtuales son iguales.

Supongamos tener dos rodillos M y N unidos por un hilo que apoya en una roldana P, en forma que al efectuarse un desplazamiento virtual Δ l sobre los planos inclinados, el mismo se efectúe sin roces.



El principio de los trabajos virtuales permite expresar:

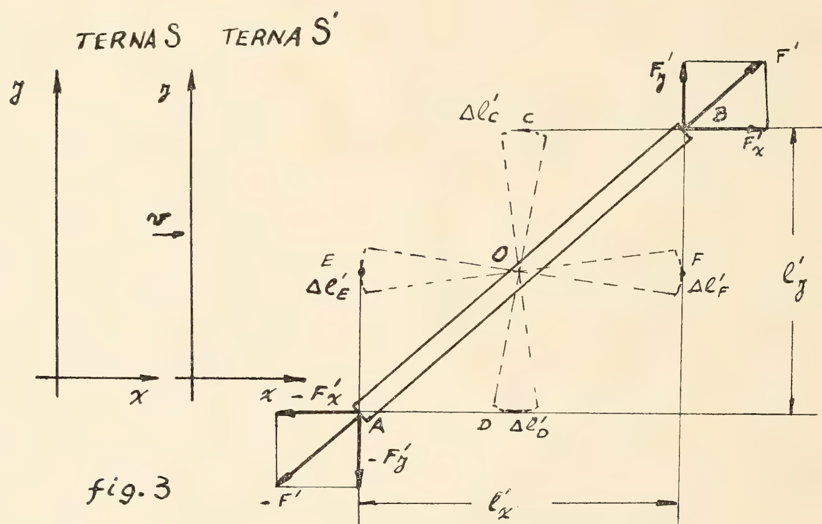
$$P_1 \,.\, \text{sen}\; \alpha_1 \;\Delta l - P_2 \,\text{sen}\; \alpha_2 \,.\, \Delta l = 0$$

Luego:

$$P_1 \,.\, \text{sen}\; \alpha_1 = P_2 \,.\, \text{sen}\; \alpha_2$$

La condición de equilibrio determina para todos los casos similares de planos inclinados, la igualación del producto de las fuerzas por el seno del ángulo α. Establecer los productos de las fuerzas por las distancias (momentos), en el equilibrio de la palanca, debe carecer entonces de sentido físico, como establecer el producto de los pesos por los senos de los ángulos en el equilibrio de los rodillos.

2.2. Barra en tracción



En la terna S' la barra se encuentra en reposo, en virtud de que las fuerzas F' son iguales, opuestas y colineales con el eje de la barra. En cambio desde la terna S, por contracción de las fuerzas transversales y de las longitudes paralelas al movimiento, se genera, como en el caso anterior un desbalance de las cuplas. No obstante ello el giro no se produce, y esta situación permite ser explicada por el principio de los trabajos virtuales. A tal efecto, se descomponen las fuerzas F′ y − F′ en las componentes F′x, F′y, −F'x, −F'y, las que pueden ser consideradas como aplicadas en los puntos C, F, D, y E, respectivamente.

Se efectuamos un pequeño giro virtual $\Delta\,\theta'$ del plano que contiene las fuerzas alrededor del punto O, que se halla ubicado en el centro de la barra, el trabajo virtual de las fuerzas componentes, dará la siguiente condición de equilibrio:

$$F'_y \cdot \Delta\theta'_{E-F} \cdot l'_x - F'_x \cdot \Delta\theta'_{C-D} \cdot l'_y = 0$$

Al ser los giros $\Delta\theta'_{C-D}$ en C y D iguales a $\Delta\theta'_{E-F}$ en E y F, se obtiene enseguida la fórmula de los momentos.

Para el sistema S se cumple:

8) $$F_y \cdot \Delta\theta_{E-F} \cdot l_x - F_x \cdot \Delta\theta_{C-D} \cdot l_y = 0$$

Siendo:

$$F_x = F'_x$$

$$F_y = \frac{1}{\gamma_v} \cdot F'_y$$

$$\Delta\theta_{C-D} = \Delta\theta'_{C-D} \cdot \frac{1}{\gamma_v}$$

$$\Delta\theta_{E-F} = \Delta\theta'_{E-F} \cdot \gamma_v$$

$$l_y = l'_y$$

$$l_x = l'_x \cdot \frac{1}{\gamma_v}$$

Reemplazando estos valores en la fórmula 8, queda:

$$F'_x \cdot l_y' - F'_y \cdot l_x = 0$$

Al verificarse la expresión 8, se demuestra también la inmovilidad de la barra para la terna S.

La explicación del no giro de la barra por las reacciones elásticas, plantea ciertos interrogantes:

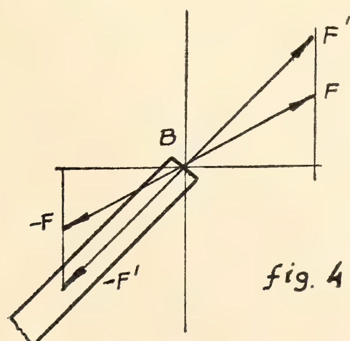


fig. 4

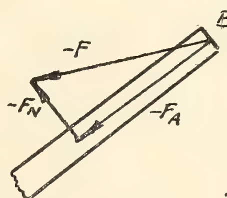


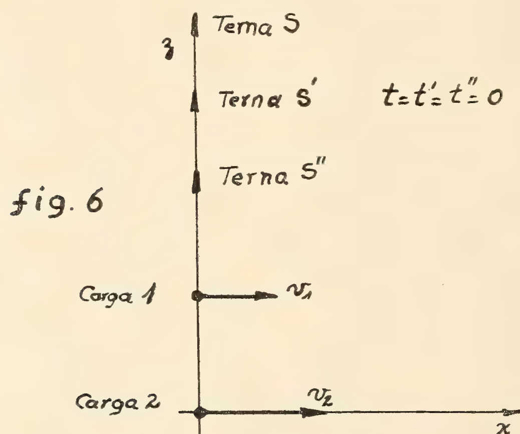
fig. 5

En la fig. 4, a la fuerza F' se opone la reacción —F'. Para la terna S, ambas fuerzas se reducen y se inclinan igualmente, en forma que siguen anulándose.

En la fig. 5, se descompuso la reacción —F en las fuerzas —F_N normal a la barra y —F_A axial con la misma. La reacción es producida por las tensiones del material, y es difícil aceptar una reacción elástica como la —F_N, que en las condiciones del problema, sólo puede justificarse por un apoyo en B, lo que no sucede en este caso, o por una rotación acelerada; pero que no explicaría lo que se deseaba, es decir, la inmovilidad de la barra.

Puede apreciarse finalmente que el principio de acción y reacción no se cumple, ya sea cuando las fuerzas están en los extremos de la barra, formando en ese caso una cupla para la terna S, o bien cuando las fuerzas están en un mismo punto en el extremo de la barra; en cuyo caso, la reacción elástica se inclina, perdiendo la característica de tal fuerza que sólo la conserva de haberse mantenido coaxil con el eje de la barra.

3. FUERZAS ELECTRODINAMICAS ENTRE CARGAS EN MOVIMIENTO



Supongamos las ternas S, S' y S'' tales que sus tres ejes estén superpuestos en los tiempos $t = t' = t'' = 0$ y con las cargas 1 y 2 dispuestas como muestra la figura 6. Supongamos la terna S "en reposo" y móviles las restantes, en forma que v sea la velocidad de la terna S' respecto a la S y V la velocidad de la terna S'' en relación a la S'.

Suponemos además la carga eléctrica 1 fija a la terna S' y la 2 a la S''. De esta forma, la velocidad de la carga 1 respecto a la terna S será v, la de la carga 2 en relación a la terna S' será V y v_2 la velocidad de la carga 2 respecto a la terna S.

Sean además E_z, E'_z y E_z'' las intensidades del campo eléctrico según el sentido de las z positivas, y H_y, H'_y y H_y'' las intensidades de campo magnético según el eje de las y positivas, generadas por la carga 1 sobre la 2 y referidas a las ternas S, S', y S'', respectivamente.

Según la relatividad se cumple:

9) $$H_y = \gamma_v \left(H'_y + \frac{v}{C} \cdot E'_z \right)$$

10) $$E_z = \gamma_v \left(E'_z + \frac{v}{C} \cdot H'_y \right)$$

donde:

11) $$\gamma_v = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{C}\right)^2}}$$

Como en la terna S' es $H'_y = 0$ al estar la carga 1 fija a esa terna, las fórmulas 9 y 10 quedan:

$$H_y = \gamma_v \cdot \frac{v}{C} \cdot E'_z$$

12) $$E_z = \gamma_v \, . \, E'_z$$

El campo eléctrico que actúa sobre la carga 2 puede también determinarse por la expresión de Lienard Wiechert.

13) $$\overline{E} = \frac{Q}{r^2} \cdot \frac{(1 - \beta^2)}{(1 - \beta^2 \, . \, \text{sen}^2 \, \theta)^{3/2}} \; \overset{v}{1}_r$$

Siendo r el módulo del vector $\overline{r}$ que une a las cargas 1 y 2; θ es el ángulo que forma $\overline{r}$ y $\overline{v}$; Q la cantidad de electricidad de la carga 1 ó 2; y $\overset{v}{1}_r$ el versor del vector $\overline{r}$.

Al ser

$$\beta = \frac{v}{C} \quad \text{y} \quad \theta = 90°$$

queda: $$\overline{E}_z = \frac{Q}{z^2} \cdot \frac{1}{(1 - \beta^2)^{1/2}} \cdot \overset{v}{1}_z$$

Como

$$z = z' \quad y \quad E'_z = \frac{Q}{z'^2}$$

Resulta finalmente:

$$E_z = \gamma_v \cdot E'_z.$$

3.1. Fuerza electrodinámica

En la terna S la fuerza electrodinámica que el campo Hy produce sobre el elemento de corriente de la carga 2 es:

$$F_m = - H_y \cdot \frac{Q \cdot v_2}{C}$$

o bien:

14) $$F_m = - \gamma_v \cdot E'_z \cdot Q \cdot \frac{v \cdot v_2}{C^2}$$

Con el signo menos indicamos una fuerza de atracción entre las cargas.

Observaremos ahora hechos aparentemente incongruentes sobre la característica de esta fuerza al ser considerada independientemente de la fuerza electroestática.

De acuerdo a la expresión 14, si la terna S se identifica con la S', es decir, si se cumple v=o se anula Fm. De igual forma, si la terna S se identifica con la S'', es decir, si v_2=o, nuevamente se anula Fm. Si adoptamos una cuarta terna S''' cuya velocidad respecto de S sea:

$$v_3 = \frac{v + v_2}{2}$$

al identificarse la terna S con la S''', las velocidades de las cargas respecto de esta terna y consideradas despreciables respecto de la velocidad de la luz C, serán:

$$v^{III} = v - v_3 = \frac{v - v_2}{2}$$

$$v_2^{III} = v_2 - v_3 = - \frac{v - v_2}{2}$$

Donde v^{III} y v_2^{III} son las nuevas velocidades a considerar en la expresión 14. La fuerza Fm cambiará de sentido, siendo ahora de repulsión.

La dinámica relativista exige al cambiar ternas que las fuerzas transversales al movimiento se reduzcan según el factor $^1/\gamma$, el que depende sólo de la velocidad relativa entre las ternas. Como para velocidades pequeñas en relación a C, el divisor γ vale casi la unidad, las fuerzas juzgadas desde ambas ternas deben ser prácticamente iguales. En el caso de la fuerza magnética ello no se verifica.

Un análisis similar nos demuestra que tampoco la fuerza electrostática, analizada individualmente se contrae según el factor $^1/\gamma$. Estas anomalías son aparentes puesto que las fórmulas aplicadas son correctas. Lo que sucede es que las fuerzas magnéticas y electrostáticas no pueden ser consideradas aisladamente, hecho éste bien conocido desde el primer trabajo de Einstein de 1905.

Lo que se desea es destacar esta característica de ambas fuerzas, en cuya emisión radica precisamente la consideración de una acción electrodinámica real en la experiencia de Trouton y Noble. De lo expuesto se deduce que ambas fuerzas aisladas no tienen sentido físico, sólo su complementación adquiere el valor de por ejemplo, la fuerza mecánica. Todo ello hace suponer que en la íntima conexión de estas fuerzas existe una génesis común, y en efecto los capítulos posteriores justifican tal apreciación.

La fuerza electrostática Fe, vista desde la terna S es:

$$F_e = E_z \cdot Q$$

La fuerza es de repulsión por tratarse de cargas de igual signo. Considerando la fórmula 12, queda:

15) $$F_e = \gamma_V \cdot E'_z \cdot Q$$

Sumando las fuerzas Fm y Fe, se obtiene la fuerza total en la terna S.

16) $$F = \gamma_V \cdot E'_z \cdot Q \left(1 - \frac{V \cdot V_2}{C^2}\right)$$

Veamos ahora si la fuerza total aplicada a la carga 2 y observada en la terna S" fija a la carga, al ser contraída por el factor $1/\gamma_{V_2}$ para obtener la observación desde la terna S, coincide con la fuerza dada por la fórmula 16.

Para determinar la fuerza sobre la carga 2 medida desde la terna S", consideremos en principio, a la terna S identificada con aquella. Se obtiene:

$$E_z'' = \gamma_V \left(E'_z - \frac{V}{C} \cdot H'_y \right)$$

pues:

$$v = - V \quad y \quad \gamma_V = \gamma_{-v}$$

No tiene sentido considerar H'_y puesto que al no existir corriente de Rowland de la carga 2, la fuerza electrodinámica se anula. Luego:

17) $$F'' = \gamma_V \cdot E'_z \cdot Q$$

F" es la única fuerza medible sobre la carga 2, desde la terna S". Trasladando S a su posición original, la F", observada desde esta última terna vale:

18) $$F = \frac{\gamma_V}{\gamma_{v_2}} \cdot E'_z \cdot Q$$

Para que la fuerza dada por la fórmula 16, satisfaga la contracción de las fuerzas transversales, debe cumplirse, por igualación de las fórmulas 16 y 18:

$$\frac{\gamma_V}{\gamma_{v_2}} = \gamma_v \cdot \left(1 - \frac{V \cdot v_2}{C^2} \right)$$

Igualdad ésta, que se verifica.

3.2. Paradoja de los sucesos

En el artículo del mismo nombre del título del ingeniero Alfredo González publicado en los Anales de la Sociedad Científica Argentina, de enero-febrero de 1966, se analizaron las acciones electrodinámicas de dos cargas eléctricas a igual velocidad que según el observador en reposo con las mismas resultan ser nulas y que en cambio, deben ser acusadas por el observador de otra terna inercial que se desplaza paralelamente a velocidad uniforme según el eje de las x.

Lo precedente se explicaría por el autor, al considerar para tales cargas en movimiento una corriente eléctrica según el experimento de Rowland, y al aplicarse las conclusiones de la experiencia de Ampere como válidas para cualquier sistema inercial de acuerdo a la primera hipótesis de la relatividad especial. Al considerar la existencia de acción electrodinámica en un condensador cargado

para la terna en movimiento respecto al mismo, y la anulación de aquélla para la terna en reposo con el condensador, se llega a una situación paradójica.

Si para cualquier terna el condensador no gira, se salva tal hecho paradójico. Ello exige una demostración satisfactoria de la inmovilidad del condensador y de la diferencia básica de la acción electrodinámica entre cargas en movimiento dentro y fuera de los conductores.

Al considerarse la fuerza electrostática juntamente con la electrodinámica, como lo exige la relatividad, la cupla creada por esta última fuerza puede ser reemplazada por la cupla rotatoria de igual valor creada por la contracción de las fuerzas transversales y distancias paralelas al movimiento. Ello permite, considerar al condensador, como un caso similar al de la barra en tracción, y por aplicación de las reacciones elásticas determinar la inmovilidad de aquél para cualquier terna inercial. Con tal procedimiento, el reemplazo de las cuplas no está plenamente justificado, y no queda bien aclarado el causal que conduce a la eliminación de la acción electrodinámica. Además, la explicación por el recurso de las fuerzas elásticas puede ser reemplazado por una más satisfactoria mediante el empleo del principio de los trabajos virtuales.

En los capítulos siguientes, al analizarse el experimento de Trouton y Noble, se demuestra la inexistencia de acción electrodinámica para cualquier terna inercial y a la vez, la razón de que tal acción se torne real para el caso de cargas a iguel velocidad dentro de ambos conductores.

3.3. Experimento de Trouton y Noble

El fracaso de esta experiencia, al no girar las placas del condensador para el observador en reposo respecto al mismo, no encontró explicación en la física clásica. La fuerza electrodinámica entre las placas cargadas, generadas por las corrientes de esas cargas en relación con la entonces terna en reposo con el éter, se la consideraba factor determinante del giro, excluyendo en el estudio a la fuerza electrostática.

La relatividad, al considerar inseparables ambas fuerzas nos determina que la fuerza electrostática entre las placas, según la terna S', y al observarse desde la terna S, se transforme como

la fuerza mecánica. Es decir, la acción electrodinámica no se debe apreciar en este experimento.

La inmovilidad del condensador para la terna S, puede demostrarse por aplicación del principio de los trabajos virtuales, como se hizo con la barra en tracción.

Es evidente, que la propiedad de la fuerza electrodinámica en el caso de los conductores donde la acción es efectiva no se manifiesta en el caso en estudio. La transformación de la fuerza electrostática en los cambios de ternas, anula la efectividad de aquella fuerza al crear una componente de igual valor y en oposición con la misma, como se muestra seguidamente:

Consideremos para facilitar el análisis, sin por ello perder generalidad, que las placas la sustituimos por las dos cargas de la figura 6, donde se cumple ahora que $v = v_2$; es decir, ambas cargas marchan a igual velocidad.

La fuerza total en S, expresada por la fórmula 18, vale en este caso, por contracción de las fuerzas transversales al movimiento:

19) $$F = \frac{1}{\gamma_v} \cdot E'_z \, . \, Q$$

De la fórmula 14, la fuerza electrodinámica resulta:

20) $$F_m = - \gamma_v \, . \, E'_z \, . \, Q \cdot \left(\frac{v}{C}\right)^2$$

El campo eléctrico E'_z visto desde S vale $\gamma_v \, . \, E'_z$. La fuerza debida a este nuevo campo es:

21) $$F_e = \gamma_v \, . \, E'_z \, . \, Q$$

Con el desarrollo en serie de γ_v en las tres últimas expresiones, y despreciando los términos superiores a $\left(\frac{v}{C}\right)^2$ se obtiene:

22) $$F \simeq E'_z \, . \, Q - \frac{1}{2} \cdot E'_z \, . \, Q \cdot \frac{v^2}{C^2}$$

23) $$F_m \simeq - E'_z \, . \, Q \cdot \frac{v^2}{C^2}$$

24) $$F_e \simeq E'_z \, . \, Q + \frac{1}{2} E'_z \, . \, Q \cdot \frac{v^2}{C^2}$$

siendo:

25) $$\Delta F = F_e - F = E_z' . Q \cdot \frac{v^2}{C^2}$$

La fuerza F_e, en la transformación de la terna S′ a la S, se incrementa en ΔF, (en relación a F), que es de igual valor y signo contrario a la F_m, por lo que anula a esta última, al sumarse las fuerzas electrostáticas y electrodinámicas.

En consecuencia, mientras en el caso de conductores paralelos, las mismas cargas, por ejemplo electrones a igual velocidad respecto a la terna S fija a los conductores, generan una fuerza medible; en cambio, en el espacio vacío tal cosa no sucede. El conductor por intervención de los iones positivos, como se verá, al neutralizar el campo eléctrico E'_z de los electrones, permite poner de manifiesto la acción electrodinámica.

3.4. Acciones efectivas y aparentes entre las cargas

Por lo expuesto precedentemente, se concluye que la fuerza electrodinámica dada por la ley de Ampere o de Grassman, en el caso de cargas que se mueven a igual velocidad, no generan acción electrodinámica efectiva o real entre las mismas. La fuerza dada por la fórmula 22, contiene el término electrodinámico

$$- \frac{1}{2} \cdot E'_z . Q \cdot \frac{v^2}{C^2}$$

el que corresponde a una fuerza de atracción entre las cargas. Esta acción, si bien es medible desde la terna S, no puede alterar la acción electrostática y única en la terna S'. El solo cambio de terna para el observador de S' a S, no puede afectar la fuerza ponderomotriz entre las cargas, la que como se verá, depende de la velocidad V relativa entre las mismas.

La fuerza electrodinámica que depende de v, y que se genera como consecuencia de las diferentes coordenadas de espacio y tiempo de los sistemas, la denominaremos fuerza ficticia o aparente. En cambio, una acción medida sobre la terna en reposo con la carga, la definiremos como fuerza efectiva o real.

El conocimiento intuitivo del concepto de efectivo o real, se aplica tácitamente en la mecánica, estática, etc., campos éstos,

donde al medir una fuerza no es necesario definirla como real, porque así se halla implícitamente considerada en las determinaciones más comunes, como ser, las efectuadas con las balanzas.

4. MOVIMIENTO DE CARGAS ELECTRICAS EN LOS CONDUCTORES

Las cargas que se desplazan como en la figura 6, pero dentro de los conductores, generan una acción electrodinámica "real". Evidentemente este comportamiento diferente al caso del movimiento en el espacio vacío, se debe a que "algo" interviene en los conductores que hace ponderable tal acción.

Por otra parte, considerar que el proceso electrodinámico es causado sólo por la acción del movimiento de los electrones, conduce a incongruencias. Estas, y el diferente comportamiento de las cargas mencionado precedentemente, se eliminan haciendo intervenir en el fenómeno a los iones positivos de los conductores. En consecuencia, en todo efecto electromagnético debe considerarse la totalidad de las partículas eléctricas allí presentes.

4.1. Acción electrodinámica considerando sólo el movimiento de los electrones

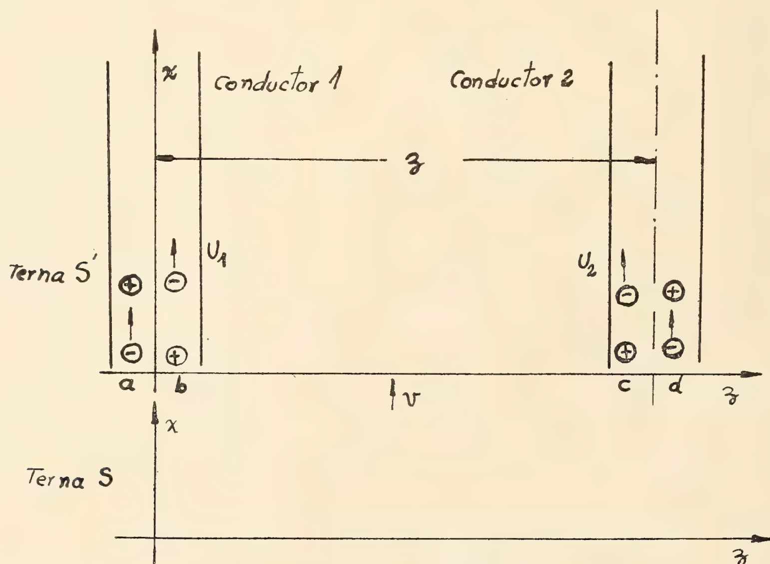


Fig. 7

Supongamos dos conductores indefinidos 1 y 2 como muestra la figura 7. Los conductores son paralelos al eje de la x, y fijos a la terna S'. Ambos están ubicados sobre el plano x, z y distanciados en z. Consideremos otra terna S con los ejes paralelos y el de las x coincidentes con los de la terna S', y a velocidad − v.

Al aplicar la ley de Biot y Savart para determinar la intensidad del campo magnético generado por la corriente del conductor 1 sobre la corriente elemental del conductor 2, puede calcularse la fuerza electrodinámica F'_2 sobre la última corriente

26) $$F'_2 = -\frac{2 \cdot i'_1 \cdot i'_2 \cdot \Delta l'_2}{z' \cdot C^2}$$

donde:

i'_1 = corriente eléctrica en el conductor 1

i'_2 = corriente eléctrica en el conductor 2

$\Delta l'_2$ = longitud elemental de la corriente i'_2 vista desde S'.

Se cumple además:

27) $$i'_1 \cdot \Delta l'_1 = Q \cdot U'_1$$

donde:

$\Delta l'_1$ = longitud elemental de la corriente i'_1 vista desde S'

Q = cantidad de electricidad correspondiente a un elemento de longitud $\Delta l'_0$.

$\Delta l'_0$ = longitud elemental $\Delta l'_1$ en reposo respecto a S'

U'_1 = velocidad promedio de los electrones del conductor 1.

Llamando ρ'_0 a la densidad volumétrica de la carga Q en reposo respecto a la terna S', se tiene:

28) $$\rho'_0 = \frac{Q}{V'_0} = \frac{Q}{s' \cdot \Delta l'_0}$$

siendo:

v'_0 = volumen ocupado por la cantidad de electricidad Q, en reposo respecto de S'.

s' = Sección del conductor.

Cuando Q se desplaza a velocidad U'_1, la nueva densidad volumétrica ρ'_1 en relación a la terna S' es:

$$29) \qquad \rho'_1 = \frac{Q}{V'_1} = \frac{Q}{s' \cdot \Delta l'_1}$$

donde:

V'_1 = volumen ocupado por la cantidad de electricidad Q que se desplaza a velocidad U'_1.

De las fórmulas 27 y 29, resulta:

$$30) \qquad i'_1 = \rho'_1 \cdot s' \cdot U'_1$$

También se cumple:

$$31) \qquad i'_2 \cdot \Delta l'_2 = \rho'_2 \cdot s' \cdot U'_2 \cdot \Delta l'_2.$$

Siendo:

ρ'_2 = densidad volumétrica de la carga Q que se desplaza a velocidad U'_2 respecto a la terna S'.

Reemplazando los valores de las fórmulas 30 y 31 en la 26, queda:

$$32) \qquad F'_2 = - \frac{2 \cdot \rho'_1 \cdot \rho'_2 \cdot s'^2 \cdot U'_1 \cdot U'_2 \cdot \Delta l'_2}{z' \cdot c^2}$$

Consideremos ahora una terna S' fija a los electrones del conductor 1. Como es $U'_1 = 0$, resulta $F'_2 = 0$. También, si la terna S' está fija a los electrones del conductor 2, la fuerza F'_2 se anula. Para una terna que se desplaze a una velocidad intermedia entre U'_1 y U'_2, la fuerza cambia de sentido. Tampoco se cumple en estas traslaciones de ternas la contracción relativista de las fuerzas transversales. Es decir, si consideramos una terna respecto a la cual, la S' se desplaza a la velocidad v, la fuerza F'_2 observada desde la terna S de valor F_2, verifica:

$$F_2 \neq \cdot \frac{F'_2}{\gamma_v}$$

4.2. Consideración de los iones positivos en el proceso electrodinámico

Haciendo intervenir los iones positivos como generando corriente de Rowland, campos magnéticos y acción electrodinámica, se soslayan los inconvenientes señalados en el ítem precedente.

La corriente de electrones en el conductor 1, producen el campo magnético H_e sobre el elemento de corriente del conductor 2. Considerando como referencia la terna S, se tiene:

33) $$H_e = \frac{2 \cdot \rho_1 \cdot s \cdot U_1}{z \cdot c}$$

Donde:

ρ_1 = densidad volumétrica de la carga Q, a velocidad U_1.
s = sección del conductor
z = distancia entre conductores.

Como se cumple además:

$$\rho_1 = \gamma_v \cdot \rho'_1 \cdot \left(1 + \frac{v \cdot U'_1}{c^2}\right) \qquad s = s'$$

$$U_1 = \frac{v + U'_1}{1 + \frac{v \cdot U'_1}{c^2}} \qquad z = z'$$

la fórmula 33, queda:

34) $$H_e = \frac{2 \cdot \rho'_1 \cdot s' \cdot (v + U'_1)}{z' \cdot c} \cdot \gamma_v$$

como:

$$\rho'_1 = \rho'_0 \cdot \gamma_{U'_1} \quad y \quad \gamma_{U'_1} = \frac{1}{\sqrt{1 - (U'_1/c)^2}}$$

y por ser $U'_1 << C$, puede despreciarse el término $(U'_1/c)^2$ por lo que se cumple:

$$H_e = \frac{2 \cdot \rho'_0 \, s' \cdot (v + U'_1)}{z' \cdot c} \cdot \gamma_v$$

En forma análoga, el movimiento de los iones positivos, crean el campo magnético H_i.

$$H_i = \frac{2 \cdot \rho'_0 \cdot s' \cdot v}{z' \cdot c} \cdot \gamma_v$$

Esta fórmula resulta de considerar la misma cantidad Q de electricidad y densidad volumétrica de carga, que la correspondiente a los electrones, en reposo con la terna S'.

El campo magnético resultante H_r es:

35) $$H_r = \frac{2 \cdot \rho'_0 \cdot s' \cdot U'_1}{z' \cdot c} \cdot \gamma_v$$

Veamos ahora la corriente elemental de los electrones en el conductor 2,

36) $$(c \cdot e \cdot e)_2 = \frac{\rho_2 \cdot s \cdot U_2 \cdot \Delta l_2}{c}$$

Donde:

ρ_2 = densidad volumétrica de la carga Q a velocidad U_2.

Δl_2 = longitud ocupada por la carga Q a velocidad U_2.

Se cumple además:

$$\rho_2 = \rho_0 \cdot \gamma_{U_2} \qquad \gamma_{U_2} = \frac{1}{\sqrt{1 - (U_2/c)^2}}$$

$$\Delta l_2 = \frac{\Delta l_0}{\gamma_{U_2}} \qquad U_2 = \frac{v + U'_2}{1 + v \cdot U'_2/c^2}$$

$$\rho'_0 = \rho_0 \qquad s = s' \qquad \Delta l'_0 = \Delta l_0$$

Donde:

ρ_0 = densidad volumétrica de la carga Q en reposo con la terna S.

U_2 = velocidad de los electrones del conductor 2.

En base a estos valores, la fórmula 36 queda:

37) $$(c \cdot e \cdot e.)_2 = \frac{\rho'_0 \cdot s' \cdot (v + U'_2) \cdot \Delta l'_0}{c \cdot (1 + v \cdot U'_2/c^2)}$$

Por un razonamiento similar, la corriente elemental de los iones del conductor 2, vale:

38) $$(c \cdot e \cdot i)_2 = - \frac{\rho'_0 \cdot s' \cdot \Delta l'_0 \cdot v}{c}$$

Las densidades espaciales en reposo con la terna S′, coinciden para los iones y electrones. También las longitudes elementales en reposo $\Delta l'_0$, son las mismas para ambas cargas. Además concuerdan los ρ'_0 para ambos conductores por ser del mismo material.

Sumando algebraicamente las expresiones 37 y 38 se obtiene la corriente elemental resultante:

$$(c \,.\, e \,.\, r)_2 = \frac{\rho'_0 \,.\, s' \,.\, \Delta l'_0 \,.\, U'_2}{c \,.\, (1 + v \,.\, U'_2/c^2)} \cdot \frac{1}{\gamma_{v^2}}$$

Puede ahora despreciarse $\frac{v \,.\, U'_2}{c^2}$ respecto a la unidad.

39) $$(c \,.\, e\, r)_2 = \frac{\rho'_0 \,.\, s' \,.\, \Delta l'_0 \,.\, U'_2}{c} \cdot \frac{1}{\gamma_{v^2}}$$

Por el producto de las fórmulas 35 y 39 se tiene:

40) $$F_2 = - \frac{2\, (\rho'_0)^2 \,.\, (s')^2 \,.\, \Delta l'_0 \,.\, U'_1 \,.\, U'_2}{z' \,.\, c^2} \cdot \frac{1}{\gamma_v}$$

Como:

$$\rho'_1 = \rho'_0 \cdot \gamma_{U'_1} \qquad \Delta l'_2 = \frac{\Delta l'_0}{\gamma_{U'_2}}$$

$$\rho'_2 = \rho'_0 \cdot \gamma_{U'_2}$$

y al ser U'_1 y $U'_2 << c$, se puede afirmar:

$$\rho'_1 \simeq \rho'_0, \quad \rho'_2 \simeq \rho'_0 \quad \text{y} \quad \Delta l'_2 \simeq \Delta l'_0$$

Considerando estos valores en la fórmula 32, queda:

$$F'_2 = - \frac{2 \,.\, (\rho'_0)^2 \,.\, (s')^2 \,.\, \Delta l'_0 \,.\, U'_1 \,.\, U'_2}{z' \,.\, c^2}$$

Ahora sí se cumple:

41) $$F_2 = F'_2 \cdot \frac{1}{\gamma_v}$$

Es decir, se verifica la condición de contracción de las fuerzas transversales. Tampoco se anula ahora F_2 al adoptar ternas en reposo respecto a los electrones. Este resultado nos demuestra de la necesidad de considerar en el proceso electrodinámico a los iones positivos de la materia, sin los cuales, resulta incompleta la explicación del mismo.

5. MOVIMIENTO DE CARGAS EN EL ESPACIO VACIO FUERZA ELECTRODINAMICA REAL Y APARENTE

En el caso de la figura 6, se vio que la fuerza total era:

$$16)\qquad F = \gamma_V \cdot E'_z \cdot Q \cdot \left[1 - \frac{V \cdot V_2}{c^2}\right]$$

Además:

$$18)\qquad F = \frac{\gamma_V}{\gamma_{V_2}} \cdot E'_z \cdot Q$$

Luego:

$$\frac{\gamma_V}{\gamma_{V_2}} \cdot E'_z \cdot Q = \gamma_V \cdot E'_z \cdot Q - \gamma_V \cdot E'_z \cdot Q \cdot \frac{V \cdot V_2}{C^2}$$

En el 2º término la fuerza es del tipo electrodinámico. En cambio, en el 1er. miembro, no se evidencia inmediatamente tal fuerza. Analizando por pasos y en forma eliminativa, consideremos al factor γ_{V_2}. Este valor se aplica en forma general a todo tipo de fuerza transversal al movimiento. Evidentemente el efecto electrodinámico no está contenido en ese valor. El factor, $E'_z \cdot Q$ es la fuerza electrostática en la terna S′; tampoco en ese valor puede residir el término electrocinético.

Finalmente, al factor γ_V, el último que resta analizar, debe pues serle atribuido aquel efecto, el que depende de V, la velocidad relativa entre las cargas.

Cuando V = O, caso del experimento de Trouton y Noble, la fuerza electrodinámica dada por la ley de Ampere era anulada por una componente del campo eléctrico relativista, restando un término electrocinético función de v^2/c^2; el que se consideraba una fuerza aparente sólo dependiente de las coordenadas de espacio y tiempo de las diferentes ternas.

Para determinar una fuerza o acción electrodinámica real o efectiva en el sentido previamente definido, debemos trasladar las observaciones a la terna que se halla en reposo respecto a la carga en estudio. Para ello, consideramos a la terna S″ fija a la carga 2.

Se determinó:

$$17)\qquad F'' = \gamma_V \cdot E'_z \cdot Q$$

Se indica F″ en lugar de F. Esta fuerza debe ser efectivamente

medida sobre la carga 2. Analicemos su significado. La intensidad de campo eléctrico E_z', se halla en reposo respecto a la terna S' y debe ser igual a E''_{z_0}, que consideramos en roposo respecto a la terna S''. Luego se cumple:

$$E'_z \, . \, Q = E_{z_0}'' \, . \, Q$$

La fuerza $E_{z_0}'' \, . \, Q$ es inferior a la F'' en el valor:

42) $$F_r'' = E_{z_0}'' \, . \, Q \, [\gamma_V - 1]$$

Esta fuerza F'', que es función de V, deberá ser realmente medida y es de origen netamente elctrodinámico. Su valor es reducido a las velocidades de los electrones en los conductores, pero para velocidades cercanas a C, puede ser superior a $E_{z_0}'' . Q$. Por medirse en el sistema en reposo a la carga, la denominaremos fuerzas electrodinámica real.

5.1. Característica de la fuerza total

Si a la fuerza total F, le restamos la electrostática neta o pura $E_{z_0}'' . Q$. nos quedaría un término que será de características netamente electrodinámicas F_{em} de valor:

43) $$F_{em} = E'_z \, . \, Q \left[\frac{\gamma_V}{\gamma_{V_2}} - 1 \right] = E'_z \, . \, Q \left[\gamma_V - 1 - \gamma_V \cdot \frac{V \, . \, V_2}{c^2} \right] \text{ pues:}$$

$$E_{z_0}'' = E'_z$$

desarrollando en serie γ_V y despreciando términos superiores a $(v/c)^2$ queda:

44) $$F_{em} \simeq E'_z \, . \, Q \left[\frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2 - \frac{v \, . \, v_2}{c^2} \right]$$

Como vimos, hay un efecto electrodinámico real que depende sólo de las ternas fijas a las partículas actuantes, y cuyo valor dado por la fórmula 42, difiere del correspondiente a la fórmula 44. Es evidente que F_{em} contiene elementos reales y aparentes electrodinámicos. Para discriminar estos últimos desarrollamos en serie γ_V en la 42, por lo que despreciendo términos superiores a $(v/c)^2$ queda:

45) $$F_r'' \simeq \frac{1}{2} \cdot E_{z_0}'' \, . \, Q \cdot \left(\frac{V}{C} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot E_z' \, . \, Q \cdot \left(\frac{V}{C} \right)^2$$

Restanto F_r'' de la F_{em}, se obtiene la fuerza electrodinámica netamente aparente. Luego:

$$46) \qquad F_a \simeq -\frac{1}{2} \cdot E'_z \cdot Q \cdot \left(\frac{v_2}{C}\right)^2$$

5.2. Fuerza electrodinámica aparente

Se observa que entre dos cargas de igual signo que se desplacen según se muestra en la figura 6, la fuerza aparente es de atracción opuesta a la dirección de la fuerza electrostática pura.

Cuando nos ubicamos en la terna S a la que hacemos identificar con la terna S″ será $v_2 = 0$. En este caso, resulta también $F_a = 0$. Este resultado es lógico pues vimos que en estas condiciones sólo se aprecia una fuerza electrodinámica real.

En el caso del experimento de Trounton y Noble se vio:

$$F \simeq E'_z \cdot Q - \frac{1}{2} E'_z \cdot Q \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

El 2º término fue definido como una fuerza aparente. La 46, nos permite obtener enseguida dicho valor, con sólo hacer $V = 0$ y $v = v_2$. Luego:

$$47) \qquad F_a = -\frac{1}{2} \cdot E'_z \cdot Q \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

5.3. Fuerza electrodinámica real

Esta fuerza, contrariamente a lo que sucede con las acciones entre corrientes elementales de conductores paralelos, no depende del signo de la velocidad. Es decir, con $\pm$ V, la fuerza F_r'' es la misma en valor absoluto y en signo. Si F_r'' es de atracción o repulsión depende sólo del signo de la fuerza electrostática pura entre las cargas, y coincide con el sentido de la misma.

La fuerza electrodinámica F_r'', resulta ser del tipo eléctrico, y proviene de las líneas del campo eléctrico adicionales a las correspondientes al campo electrostático puro, debido a la contracción del espacio físico en el sentido del movimiento.

5.4. Aplicación de la fuerza electromagnética real

El valor aproximado de la fuerza F_r'' era:

48) $$F_r'' \simeq \frac{1}{2} \cdot E''_{z_0} \cdot Q \left(\frac{V}{c}\right)^2$$

Podemos en el caso de la figura 7 considerar las interacciones entre las cargas *a* y *b* del conductor 1 sobre las cargas *c* y *d*, del conductor 2.

Las fuerzas actuantes son:

a) Acción de la carga *a* sobre la *c*.

$$F_r' \simeq -\frac{1}{2} \cdot E_z' \cdot Q \cdot \left(\frac{U'_1}{c}\right)^2 \qquad \text{atracción}$$

b) Acción de la carga *a* sobre la *d*.

$$F_r'' = \frac{1}{2} \cdot E_{z_0}'' \cdot Q \left(\frac{U'_1 - U'_2}{c}\right)^2 \quad \text{repulsión}$$

Consideremos la terna S″ fija a la carga *d*. La velocidad relativa es:

$$V \simeq U'_1 - U'_2$$

y se cumple además:

$$E_{z_0}'' \cdot Q = E'_z \cdot Q.$$

pues son dos fuerzas electrostáticas puras sobre una misma carga, y medidas en reposo con sus respectivas ternas. Ninguna experiencia puede encontrar diferencias pues ello equivaldría a identificar un sistema en movimiento uniforme, desde el mismo sistema. Luego:

$$F_r'' = \frac{1}{2} \cdot E'_z \cdot Q \cdot \left(\frac{U'_1 - U'_2}{c}\right)^2$$

c) Acción de la carga *b* sobre la *d*.

$$F_r'' = -\frac{1}{2} \cdot E_{z_0}'' \cdot Q \left(-\frac{U'_2}{c}\right)^2$$

atracción

o bien: $$F_r'' = -\frac{1}{2} \cdot E'_z \cdot Q \left(\frac{U'_2}{c}\right)^2$$

Sumando algebraicamente las tres fuerzas resulta:

$$F' = -\frac{E'_z \,.\, Q \,.\, U'_1 \,.\, U'_2}{c^2}$$

Como $E'_z = Q/z'^2$ y siendo

$$i_1' \,.\, dl_1' = Q \,.\, U_1'$$

$$i_2' \,.\, dl_2' = Q \,.\, U_2'$$

Resulta finalmente:

$$F' = -\frac{i_1' \,.\, i_2' \,.\, dl_1' \,.\, dl_2'}{c^2 \,.\, z'^2}. \qquad 49)$$

Un procedimiento similar al expuesto en este ejemplo, utilizando la expresión relativista del campo eléctrico, que se considera en este estudio, fue empleado por el Dr. Fidel A. Alsina en su trabajo "Acciones ponderomotrices entre corrientes paralelas" [1], publicado en Anales en su entrega I de enero del año 1951. Este trabajo, como otros posteriores del mismo autor, marcan un jalón de importancia para el esclarecimiento y divulgación de una nueva electrodinámica, basada sólo en las leyes electrostáticas y relativistas.

6. CONCLUSIONES

La teoría de la relatividad especial, en su exigencia sobre la covariancia de las leyes naturales para los diferentes sistemas inerciales, conduce a descartar a la condición de los momentos en el equilibrio de los cuerpos y en cambio a considerar de aplicación el principio de los trabajos virtuales.

En la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, la relatividad permite explicar las aparentes diferencias de comportamiento de las cargas dentro y fuera de los conductores.

[1] Entregado los borradores a la Sociedad Científica Argentina, el Dr. José F. Westerkamp me informó de los trabajos del Dr. Fidel A. Alsina publicados en Anales, y de otros autores entre los que cabe mencionar el libro del profesor E. Geoffrey Cullwick « Fundamentals of Electromagnetism » y del Dr. Edward M. Purcell « Electricity and Magnetism » en los que se emplea el campo eléctrico relativista y los iones positivos para la determinación de la ley de Ampere sobre las acciones ponderomotrices entre corrientes en conductores paralelos.

Los estudios posteriores del autor sobre el presente trabajo permiten determinar una ley electrodinámica entre cargas eléctricas basada en la fuerza electrodinámica real, que conduce en el caso de corrientes en conductores a la generación de una cupla electrocinética entre dos elementos diferenciales. La integración curvilínea en un circuito cerrado, determina sobre un elemento de corriente de otro circuito estacionario, una fuerza coincidente con la que se obtendría por las leyes diferenciales de Grassmann o de Ampere.

CENTRALES NUCLEARES

II. LOS MATERIALES NUCLEARES NO COMBUSTIBLES

POR EL DR. ING. J-P. ROUX
Profesor de la Escuela Superior de Electricidad de París
Director Adjunto de Equipamiento de Electricidad de Francia

(*Continuación*) *

9.3. GRAFITOS ESPECIALES

El grafito destinado a confinar medios fluidos, gaseosos en particular, debe ser de permeabilidad reducida.

Estos confinamientos se dirigen actualmente:

— hacia el gas de refrigeración (CO_2), teniendo por fin, elevar la temperatura de las partes más frías del moderador a fin de reducir los daños producidos por el bombardeo neutrónico y disminuir la tasa de renovación del gas y la corrosión química; los manchones de unión entre ellos, rodean los elementos combustibles y le confieren un sostén mecánico (CAMISAS, utilizadas para EDF 2 y HUNTERSTON)

— hacia los productos de fisión, cuando se utilizará el grafito como vaina del elemento combustible (DRAGON, SCHULTEN).

Las exigencias, frente a la permeabilidad residual del grafito serán bastante más grandes en el segundo caso que en el primero.

Las resinas sintéticas no convienen para la industria nuclear, en razón de su rápida destrucción por radiólisis

Se ha buscado de poner a punto métodos obturantes de poros por depósitos de carbono.

* Ver las partes del capítulo I y II en las entregas I-VI del tomo CLXXXIV, I-VI del tomo CLXXXV y I-II del presente tomo.

10. LOS LIQUIDOS ORGANICOS

10.1. Introducción

10.1.1. *Generalidades*

Los fluídos orgánicos pueden ser utilizados como moderadores o como fluídos portadores de calor.

Tratándose de *moderador*, estas substancias imponen el empleo de *uranio enriquecido*.

Es en el año 1955 que los Estados Unidos toman la decisión de financiar la construcción de *O.M.R.E.* [1], reactor cuya marcha a plena potencia se obtiene en 1958.

En 1959, en Canadá es puesto a punto un anteproyecto de un reactor experimental *enfriado* por líquido orgánico y moderado con agua pesada.

En este mismo año, EURATOM pone a estudio el proyecto ORGEL.

La idea de utilizar fluídos orgánicos como moderador-enfriador del reactor, se funda en las siguientes ventajas:

- Las *presiones* en el reactor y en el sistema de enfriamiento primario quedan *débiles*.
- La retardación de los neutrones por el hidrógeno, permite una *construcción compacta*.
- Se puede obtener una *buena economía* de neutrones.
- *El coeficiente de temperatura es fuertemente negativo* gracias a la naturaleza líquida del moderador.
- *No hay riesgo de una reacción química violenta* entre los fluídos orgánicos y los materiales de estructura, en particular, el uranio o el agua.
- *Hay muy poco riesgo de corrosión* de los materiales de revestimiento por los fluídos orgánicos.
- La *activación* de los fluídos orgánicos debida esencialmente a las impurezas puede *hacerse muy débil*.

Por el contrario, los fluídos orgánicos tienen una desventaja grande, que consiste en su *inestabilidad* en relación al *calor* y a la *irradiación del reactor*.

[1] Organic Moderated Reactor Experiment, potencia 6 a 10 MW.

10.1.2. *Características importantes a considerar*

Teniendo en cuenta lo que antecede, un líquido orgánico utilizado como moderador o como fluído portador de calor debe satisfacer un cierto número de condiciones. Los puntos más importantes son los siguientes:

- Características nucleares (poder retardatriz, absorción de neutrones).
- Estabilidad térmica.
- Estabilidad a la irradiación.
- Características físicas: tensión del vapor
punto de fusión
masa volumétrica
viscosidad
calor específico
conductibilidad térmica.
- Transferencia térmica.
- Ensuciamiento.
- Corrosión.
- Radioactividad inducida.

10.1.3. *Principales productos orgánicos reservados. Niveles*

Los principales productos orgánicos, reservados para posibles moderadores-enfriadores de reactores nucleares, son los hidrocarburos aromáticos a núcleos conjugados y ciertos substitutos de sus derivados.

Estos son más exactamente los tres isómeros:

Orto, méta, para-*terfenilo.*

difenilo y ciertos alkyl-*difenilo*.

Estos responden a la fórmula general:

$X\text{-}C_6H_5\text{-}(C_6H_4)n\text{-}C_6H_5$ donde X es un radical.

Los polifenilos son sólidos en la temperatura ambiente, pero producen entre ellos mezclas eutécticas con puntos bajos de fusión.

Los *polifenilos* son en general utilizados como fluídos térmicos *a temperaturas elevadas, pero inferiores a 400° C.*

Observación: Se ha considerado la elección de otros productos que los antes citados. En efecto, parece difícil poner a punto procedimientos de producción mucho más económicos por el camino de síntesis que los que se puede obtener ya desde ahora, para la producción a gran escala de terfenilos.

10.2. Características

10.2.1. *Características nucleares. Radiólisis*

Si se compara los diversos moderadores entre sí, se llega a la tabla siguiente:

Moderadores	Sección de captura en relacion de neutérmicas (cm^{-1})	Poder de retardación (cm^{-1})	Relación de retardación
Agua................	0,0220	1,35	61
Agua pesada.........	0,000094	0,188	2000
Grafito.............	0,000386	0,061	158
Líquido orgánico.....	0,0111	0,71	64

En comparación con los neutrones rápidos o en retardación, un hidrocarburo se comporta como un mezcla sencilla de hidrógeno y de carbono, jugando en realidad el primer elemento el papel principal, lo que le aproxima al agua liviana.

Los terfenilos, como todos los productos orgánicos, son sensibles a las *acciones ionizantes* de los rayos, es decir, la radiólisis.

La experiencia ha demostrado que la *radiólisis* tiene efectos de la misma naturaleza como la pirólisis, descomposición química bajo la acción del calor, (hablaremos de eso más adelante) : al mismo tiempo, *formación de gas, de productos intermediarios y de polímeros.*

Sin embargo, los procesos iniciales son muy diferentes. En el corazón el fluído es sometido a numerosos rayos:

neutrones	electrones
fotones	partículas secundarias cargadas

Los *neutrones* rápidos o en el curso de retardación arrancan los átomos de C e H de las moléculas orgánicas. Estos átomos son

proyectados con *una energía de retroceso* generalmente suficiente para que los mismos se comporten como de *partículas cargadas fuertemente ionizantes.*

Los rayos β y γ actúan como los núcleos cargados con energía, provocando el desplazamiento, no de los átomos sino de los electrones (ionizaciones y excitaciones).

Sin embargo, la densidad de la ionización por unidad de recorrido de los núcleos de retroceso puede ser centenares de veces más elevada que la de los electrones o de los fotones.

Se admite generalmente que los efectos de cada rayo son aditivos y se desprecia como primera aproximación, las diferencias del espectro.

Prácticamente la gran mayoría de los daños radiolíticos provienen de la retardación de los neutrones.

Observación a este problema:

En los reactores moderados con agua pesada y enfriados por líquido orgánico, la energía de retardación de neutrones es principalmente absorbida por el moderador, de modo que el líquido orgánico sufre aquí mucho menos daños que en los reactores moderados con líquido orgánico, admitiendo siempre iguales condiciones.

Es importante precisar que el estudio de las reacciones que se producen debido a estas acciones es delicado y exige medios importantes para el análisis.

A título de ejemplo damos a continuación algunas indicaciones con cifras.

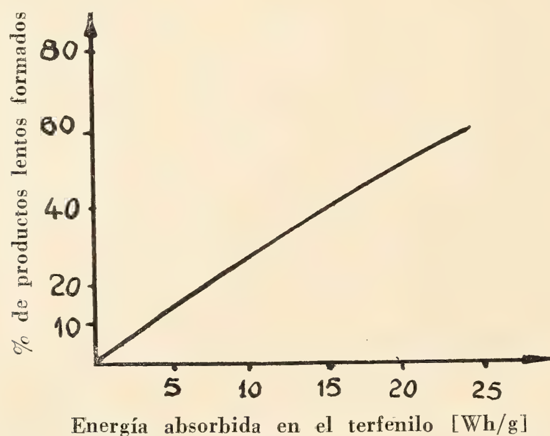


Figura 25

La temperatura en el reactor es de 300° C. La absorción de una energía de 1 Wh/g corresponde sensiblemente a la destrucción de 0,025 g del producto inicial. Para fijar las ideas, *un reactor de 200 MWe ó 600 MWt moderado por un líquido orgánico que absorbe bajo forma de irradiación, alrededor del 3 % de la potencia térmica, consumiría aproximadamente 10 toneladas de terfenilo por día.*

Observaciones:

1º Los productos provenientes de la descomposición de los terfenilos son perfectamente solubles en el terfenilo no descompuesto.

2º Entre los productos formados, se encuentra: hidrógeno, metano, carburos no saturados, bencina, difenilos, productos pesados.

3º *La estabilidad radiolítica* de un producto se mide por su *factor "G" de descomposición* el cual es definido por el número de moléculas del producto irradiado que se descompone por 100 eV de energía absorbida. Esta noción conduce a la dosimetría química y calorimétrica, cuyos resultados de mediciones permiten completar los de las mediciones de flujos neutrónicos, poco utilizables.

Los factores G, de un producto al otro pueden ser comparados.

4º El para y terfenileno OH_2 tienen una estabilidad radiolítica comparable a los 300° C.

5º Si se compara la descomposición del paraterfenileno a 300° C y a 400° C, se constata que la influencia de la temperatura es importante.

6º Numerosos ensayos están en curso; en particular los inhibidores de radiólisis son de una investigación difícil.

10.2.2. *Pirólisis*

El estudio de la estabilidad térmica ha sido efectuado principalmente sobre el paraterfenilo; este representa bien el comportamiento del conjunto de los polifenilos.

Este estudio se efectúa particularmente a los niveles de temperatura comprendidos entre 400 y 520° C, aproximadamente.

La cantidad global de gases formados está en función creciente del tiempo de pirólisis. Los productos pesados representan en peso la mayor parte de los productos de pirólisis.

Se forma el orto y el meta-terfenilo.

Hacemos notar dos remarcables características importantes:

1º Los productos pesados son perfectamente solubles en el terfenilo. Por consiguiente estamos asegurados de la perfecta ***homogeneidad del fluído portador del calor***, y prevenidos contra los riesgos de decantación, los cuales serían particularmente molestos desde el punto de vista hidráulico y térmico.

2º El punto de fusión de la mezcla terfenilo-pesados disminuye sensiblemente y *ciertas mezclas* comerciales, las cuales inicialmente sólidas a la temperatura ordinaria, se transforman en *líquidos viscosos* debido a las proporciones en polímero que se aproxima al 30 %.

Cinética de la pirólisis.

La velocidad de desaparición del terfenilo inicial puede ser representada como sigue:

$$v = -\frac{dc}{dt} = kC$$

de donde para *fracción residual* C del terfenilo en el tiempo t.

$$\boxed{C = C_0\, e^{-kt}}$$

Conclusión: Los terfenilos aparecen térmicamente estables debajo de los 400° C.

Si se admite que en una instalación en la cual se utiliza únicamente estos productos como fluídos portadores de calor, una parte solamente del circuito está a una temperatura crítica, se puede ciertamente intercambiar económicamente las calorías, utilizando estos productos a temperaturas del orden de 430 a 440° C.

10.2.3 *Características físicas*

Estas características dependen de la composición isomérica y de la proporción en productos de descomposición.

Tensión del vapor. A 450° C la presión del vapor de una mezcla a base de terfenilos es sólo de unas cuantas atmósferas, lo que facilita grandemente el problema de la construcción de los recintos de reactores y disminuye su precio de costo.

Además es posible obtener temperaturas netamente superiores a la temperatura crítica del agua (373° C) de donde existe la posibilidad de un mayor rendimiento termodinámico que con los reactores al agua.

Punto de fusión

orto	56° C
meta	87° C
para	213° C

lo que es un inconveniente para el *arranque en frío del reactor.*

10.3. Transferencia del calor y ensuciamiento

Ensayos [1] que fueron efectuados en más de 200 puntos, han permitido establecer la correlación general siguiente para los terfenilos:

$$Nu = 0.00835\ Re^{0,9}\ Pr^{0,4}$$

La sección de ensayo fue un tubo de acero inoxidable de un largo de 80 cm, calefaccionado y de un diámetro interior de 12 mm y de un espesor de 1 mm.

densidad del flujo	25 a 100 W/cm²	Valores extremos para el conjunto de ensayos
Velocidad	4 a 9 m/s	
temperatura de entrada	290 a 410° C	
número de Reynolds	26.000 a 370.000	
número de Prandtl	5.5 a 12	

Notamos que la relación vieja $Nu = 0.023\ Re^{0.8}\ Pr^{0,4}$ fue a menudo aplicada a los terfenilos.

En todos los casos es prácticamente posible sobrepasar un coeficiente de transferencia de $1\ W/cm^2$ con las velocidades de circulación vecinas a 6 m/s las cuales implican solo una pequeña *potencia de bombeo.*

Esto permitiría, teniendo en cuenta las diferencias de temperaturas admisibles, realizar *flujos térmicos de 40 a 50* W/cm^2, en el punto más cargado del reactor.

[1] Euratom - C. E. A.

Recordamos que para el agua: 120 y eventualmente 150 a 200 W/cm^2.

Presentamos así las características con relación al agua:

Desventajas	Eventuales ventajas
Potencia específica igual a la de los reactores al agua si se duplica o triplica la superficie de elementos combustibles : esto es oneroso.	Líquido poco corrosivo
Para la extracción de calorías del reactor se necesitan caudales macizos de líquido orgánico más importantes que el agua.	Problemas de bombeo más fáciles a resolver (ya que el agua puede ser transportada hasta una presión de algunos centenares de atmósferas).

N. B.: En relación con CO_2 a igual potencia específica, la ventaja desde el punto de vista potencia de bombeo, es de parte del líquido orgánico.

Ensuciamiento: Los estudios efectuados después de la observación de ensuciamiento en O.R.M.E. han demostrado que este inconveniente prácticamente no resultaría peligroso si se sabe mantener el líquido a una velocidad de circulación y a un grado de propiedades suficientes.

Sin embargo, este es un problema muy importante [1] ya que pone en juego la seguridad de los reactores; es pues conveniente profundizar en eso, todos los aspectos.

11. LOS GASES

11.1. Generalidades

Si se debiera considerar aquí únicamente los gases que tienen una aplicación importante como fluído portador de calor de un reactor de potencia, los mismos se resumirían, en realidad, solo a los dos siguientes:

[1] Al principio se ha considerado el fenómeno del ensuciamiento como susceptible de poner en juego el porvenir hasta de la línea orgánica.

— *El aire*, cuyo empleo en los reactores moderados por grafito ya está considerado de aquí en adelante como no susceptible a desarrollos.

— *El CO_2*, del cual se conoce el largo campo de aplicación.

Las preocupaciones de competencia entre las centrales nucleares y las centrales térmicas clásicas han conducido a los investigadores a orientar las mejoras posibles, en los dos caminos siguientes:

1º *Desarrollar la técnica existente*, utilizando por ejemplo las ventajas obtenidas por los sistemas del intercambio de calor con renovación del gas (paletas, aletas poizonales, etc.): responsables por una buena parte de las perspectivas ofrecidas por la línea de magnesio.

2º *La puesta a punto de una técnica más o menos diferente*, cuyo principal campo de estudio concierne a los reactores llamados *avanzados*.

En ambos casos el fin perseguido fue principalmente el siguiente:

— *Mejora del comportamiento a la irradiación del combustible.*

— *Aumento de la potencia volumétrica.*

— *Aumento de rendimiento.*

Se sabe que la investigación para una disminución del costo de las inversiones por la obtención de potencias volumétricas más o menos elevadas en el combustible y en el reactor, ha conducido a encarar el empleo de combustibles refractarios tipos UO_2 y UC, por ejemplo sobrepasando entonces 2000° C la temperatura máxima admisible en su núcleo.

Los combustibles utilizados pueden ser más o menos enriquecidos según el caso. Paralelamente a estos estudios, las concernientes a los materiales de envainamiento se han circunscripto principalmente a los materiales siguientes:

— *Aceros inoxidables*
— *Berilio*
— *Grafito*

En cuanto a los gases, objeto del presente capítulo, los siguientes deben ser retenidos como interesantes:

— *El anhidrido carbónico* CO_2
— *El helio* He
— *El nitrógeno* N

Anes de presentar las condiciones de empleo del He y del N y de recordar las condiciones del CO_2, señalaremos que este último gas y el helio fueron particularmente reservados como fluídos refrigerantes de los reactores siguientes, moderados con grafito:

A.G.R. (Advanced Gas-Cooled Reactor) G. B.

E.G.C.R. (Experimental Gas-Cooled Reactor) U. S. A.

DRAGON, U.K.A.E.A.

H.T.G.R. (Hight Temperature Gas-Cooled Reactor) U. S. A.

Notamos que la elección del gas, para los reactores del tipo avanzado, contribuye por una parte importante a la definición de los aspectos esenciales de estos últimos.

En las consideraciones siguientes presentaremos solo los resultados del orden cualitativo para los tres gases que nos interesan aquí.

11.2 *El Anhidrido carbónico.*

11.2.1. El anhidrido carbónico

11.2.1. *Razones por las cuales se ha elegido el CO_2 para los reactores franceses.*

— Precio de costo poco elevado.
— Producción industrial abundante.
— Tecnología relativamente simple.
— Purificación bastante poco costosa.
— Propiedades termodinámicas satisfactorias.
— Débil captura de neutrones.

— Débil activación.
— Buen comportamiento bajo irradiación.
— Límites de corrosión aceptables (tanto para los reactores "grafito" como para los "agua pesada").

El empleo del CO_2 en los reactores de características más avanzadas que las de los reactores actuales (C.E.A., E.D.F.), exige sin embargo una revisión de las posibilidades de este gas.

11.2.2. *Problemas ligados a la extensión del uso del CO_2.*

a) Problemas en relación con los materiales de envainamiento.

a 1 - *Berilio:* Recordamos que, aún suponiendo que las dificultades tecnológicas de este material sean resueltas, subsisten todavía dos motivos principales susceptibles a conferir a él una cierta restricción en el empleo [1], desde el punto de vista temperatura.

— Hinchadura por causa de la formación de helio bajo flujo neutrónico.
— Compatibilidad con el gas carbónico portador de calor.

Damos algunas precisiones sobre este último punto.

Los resultados indicados a continuación se refieren a los ensayos efectuados con probetas de Be comercial, bajo la forma de tubos [2] de diámetro 13-15 mm elaborados a 850° C.

Los parámetros de estudio fueron los siguientes (la temperatura es un parámetro evidentemente siempre presente):

— Gas carbónico no completamente resecado o húmedo (250 a 300 v.p.m. H_2O).
— Gas carbónico seco (5 v p m H_2O).
— Influencia del óxido de carbono.
— Influencia de la presión (30 y 60 atm.).
— Influencia de la pureza del metal y del modo de su elaboración.

[1] Ver 4.6. del presente capítulo.

[2] Estudio C. E. A. 1961.

Los principales resultados obtenidos han conducido a las conclusiones siguientes:

1º *El berilio comercial aparece incompatible desde 600° C, con CO_2 bajo presión elevada*, si este último no está sigurosamente *desecado.*

De ahí que alrededor de los 600° C a 615° C las curvas de oxidación parecen al principio parabólicos hasta 1000 a 1500 horas de calentamiento: pero las mismas llegan a ser enseguida sensiblemente lineales y netamente ascendentes.

Ocurre la aparición del "break-away" (descamación), interfiriendo el desconchado con este fenómeno.

En conclusión, en las condiciones precitadas, la oxidación es considerable y conduce a la deformación y a la destrucción rápida del metal .

2º La desecación intensiva del gas mejora netamente la situación, pero *se debe cuidar todavía la descamación* de la película superficial formada, *por lo menos a 700° C.*

3° A 650° C, en el CO_2 + 5 % CO a 60 atm. con 300 v.p.m. H_2O de humedad ninguna diferencia notable fue encontrada con relación a los ensayos con CO_2 sin CO.

4º La determinación del umbral de la temperatura, donde el fenómeno de la descamación aparece notablemente en función de la concentración del vapor de agua en el CO_2, y de la presión, ha sido objeto de estudios ulteriores.

En total, a las temperaturas elevadas, la corrosión por el CO_2 es un problema que debe preocupar.

a 2 - *Aceros:* Para estos materiales (tipo 18 a 25 % Cr y 8 a 25 % Ni con agregados de Nb) los estudios conducen particularmente sobre el papel, en el fenómeno corrosión, de la proporción en CO del gas.

b) Problemas relacionados con el grafito.

Para las temperaturas del orden de 600 a 650° C la corrosión puramente química del grafito puede constituir el problema más importante.

La pérdida de grafito que tiene como consecuencia una modificación de las propiedades neutrónicas del reactor y un eventual depósito en las partes frías del circuito, depósito catalizado por el hierro, debe ser limitado a un porcentaje razonable.

Se ha tratado de disminuir este inconveniente por:

— Una purificación más intensa del grafito (Va, Cu, Na, y Fe).

— Tratamiento de la superficie lo que tiene como fin disminuir la porosidad a fin de reducir la superficie de contacto; este tratamiento consiste en depositar un cuerpo extraño el cual debe aportar una mejora duradera, es decir, que por supuesto debe ser compatible con el CO_2 en todos los regímenes de funcionamiento.

11.3. El Helio

11.3.1. *Problemas de fugas y de activación*

Por razones diferentes, el helio parece tecnológicamente muy apropiado; únicamente existe un *problema muy difícil de hermeticidad*, del cual se debe tanto más preocuparse cuanto el precio del gas es muy elevado principalmente en Europa donde se está prácticamente obligado a adquirir el helio "nuclear" en EE. UU.

En los reactores avanzados los cuales utilizan He, donde *el circuito del gas es más o menos contaminado*, la presencia de fugas conduce a tomar grandes medidas de seguridad, por ejemplo, la construcción de un recinto hermético.

La activación debida al He y a las impurezas puede ser molesta por la presencia de 3 He en una proporción de 0.00013 % en el He (reactores tipo E.G.C.R. por ejemplo). Esto da por reacción (n.p.) 3 H emisor β (12,26 años).

En las mismas condiciones de funcionamiento, la activación debida al He es mucho más persistente que la del CO_2.

Si bien esto resulta molesto con motivo de la susceptibilidad a las fugas, se considera que este problema es menor, debido a las cantidades débiles puestas en juego; sin embargo, se asegura una ventilación muy cuidadosa de los locales.

11.3.2. *Comparación con el CO_2*

Teniendo en cuenta la comparación entre las potencias de soplado [2] se puede decir que el *reemplazo del CO_2 por He* en los reactores donde estos dos gases podrían utilizarse, se traduce en un *aumento de precio de kWh, debido al costo del gas*, a los problemas existentes por las *fugas y por el volumen de los ventiladores*.

El helio podría pues ser únicamente interesante si se permitiera utilizar materiales menos costosos o menos capturantes, lo que actualmente no es seguro.

Si el empleo del CO_2 puede ser puesto en cuestión por los problemas de corrosión, el empleo de He puede ser contemplado particularmente como solución de espera en función con los estudios hechos sobre otro gas.

El empleo de He a título definitivo, para ciertos reactores, está principalmente ligado a su precio.

Este gas presenta en todo caso la ventaja no despreciable de proceder a la puesta a punto rápida de ciertos prototipos.

11.4. El Nitrógeno

11.4.1. *Generalidades*

El nitrógeno ya fue objeto de un gran número de estudios y de ensayos:

— En el E.L. 2 a temperaturas relativamente bajas.
— En el Zenith, pila de potencias cero del proyecto Dragón, a alta temperatura.

Presenta en comparación con el He la ventaja de un costo menos elevado [1] y además de ser de una tecnología menos difícil en cuanto a las fugas.

11.4.2. *Problemas en relación con el grafito*

Si bien su comportamiento en relación con el grafito parece satisfactorio (no hay corrosión a alta temperatura) su empleo necesitaría sin embargo la puesta a punto de un grafito especial.

[1] Es bastante fácil disponer de él en Europa.

Las consideraciones neutrónicas permiten concluir que el nitrógeno utilizado con un grafito nuclear corriente, conduciría a la necesidad de enriquecer el combustible y aumentar el número de barras de compensación (problemas de antireactividad).

Esto tendría pues, como consecuencia, acrecentar el costo de la energía producida y de disminuir la seguridad de la instalación.

En conclusión, *la utilización del nitrógeno como refrigerante necesita el empleo de un grafito hermético.*

Conviene observar que, hasta en este caso, la antirreactividad debida a la presencia del nitrógeno en los canales, representaría todavía de 1000 a 3000 pc.m. por ejemplo, y constituiría un factor de inseguridad.

11.4.3. *La elección de los materiales de estructura*

Los ensayos han demostrado que W, Ag, Nb, Mo, Cu, Ta, Ni, Cr, presentan una buena resistencia a la nitruración; sin embargo estos elementos son interesantes, para ser elaborados en forma de aleaciones a fin de mejorar las propiedades mecánicas y neutrónicas.

En el caso de los aceros inoxidables y al Ni-Cr, los cuales son sensibles a la nitruración, se puede reducir la intensidad de la velocidad de penetración, manteniendo N ligeramente oxidante (vestigios de O o de vapor de agua).

Esto impone prácticamente un grafito protegido.

11.4.4. *Activación*

Para el *nitrógeno puro*, las reacciones son las siguientes:

14 N (n.p.) → 14 C (5800 años, β^-) La más importante.

15 N (n.) → 16 N (7,35 s, β^-, γ)

En el caso de fugas no nulas, la actividad del circuito tiende hacia un valor el cual es inversamente proporcional al coeficiente de fuga.

Si el nitrógeno no está puro teniendo, por ejemplo, la presencia de 40 A, se tendrá:

40 A (n.p.) → 14 A (1,8 hora β^-, γ); el producto formado, de vida corta, da lugar a una activación más o menos independiente

de las fugas, la cual llega bastante rápido a su valor de equilibrio.

Tan pronto que el número de átomos de 40 A sobrepasa 1 por 10^5, la actividad debida al argon llega a ser del mismo orden que la debida al nitrógeno puro.

11.4.5. *Comparación con el CO_2 y conclusión*

El nitrógeno y el argon dan actividades del mismo orden de grandeza pero del hecho que los productos formados desde el 14 N tienen una vida mucho más larga que en el caso del CO_2 (7,35 s) existe, como para el helio, contaminación (durable o momentánea según la reacción).

Desde el punto de vista de higiene del personal y limpieza del circuito, la utilización del CO_2 parece pues preferible al de N_2.

Por supuesto la comparación entre estos dos gases debe ser efectuada teniendo en cuenta la deteriorización de cada uno de los revestimientos a aplicar sobre el grafito. El resultado parecería favorable la CO_2.

Finalmente, para una potencia dada, el volumen de los sopladores en el caso del nitrógeno es casi 4 veces superior al necesario para el caso de CO_2.

En total, el nitrógeno aparece como dotado de un cierto número de inconvenientes (seguridad del reactor, activación del circuito primario, transferencia del calor) ; su empleo es pues más bien acondicionado a los resultados de investigación sobre la corrosión.

11.5, Otros gases

La eventualidad del empleo de otros gases que los antes citados está subordinada a los resultados de los estudios y de los ensayos a efectuar en los fluídos siguientes: hidrógeno, hidrocarburos, etc.

Su empleo efectivo parece relativamente muy lejano en el tiempo.

12. AGUA LIVIANA Y AGUA PESADA

12.1. Generalidades

12.1.1. *Agua liviana*

a) Agua liviana "moderadora".

El agua liviana posee el mejor poder de retardación Σ_s. La misma tiene en la sección eficaz de captura Σ_c más elevado que los principales moderadores utilizados.

De eso resultan las consecuencias siguientes, las cuales son fundamentales:

α) El agua liviana en razón de su Σ_c elevado *no puede ser empleada como moderadora sino sólo con el uranio natural como combustible.*

Este último debe ser enriquecido, lo que es una desventaja [1].

β) La cantidad de agua moderadora es relativamente débil. La posición del máximo depende de las secciones eficaces.

La relación Vmod/Vcomb, llega aproximadamente a: 2 para el agua liviana (con U metálico), cuando el mismo es del orden de 30 para el agua pesada y 50 para el grafito.

Aparece pues, desde el punto de vista práctico, una ventaja apreciable que es la *compacidad de los reactores* moderados con agua liviana.

b) Agua liviana fluído refrigerante

Precisamos aquí algunos puntos del orden general.

El punto crítico (347° C, 217 atm) limita el campo de refrigeración por el agua líquida y para obtener temperaturas suficientes es siempre necesario operar bajo fuertes presiones. De eso resulta un problema de elección, que se puede esquematizar como sigue:

[1] Ver a este objeto los capítulos sobre el tratamiento de combustibles irradiados y la separación de isótopos.

El enriquecimiento inicial se sitúa entre 1,5 y 2 °/₀ con los envainamientos en y entre 2,5 y 3,5 °/₀ cuando los envainamientos son en acero (eso para alrededor de 15.000 MWd/t).

1º Si se admite una ebullición franca en el núcleo y que el vapor sea luego, o directamente enviado a la turbina, o dirigido hacia un intercambiador, donde el mismo ceda su calor al fluído secundario, en este caso la presión del primero es pues igual, o un poco superior a la presión del vapor admitido a la turbina.

Este es el campo de los *reactores de agua hirviendo.*

2º En el caso en el cual se quiere que el agua quede en fase líquida, se tiene los *reactores a agua bajo presión* ya que como la ebullición está excluida, esto se efectúa al precio de una sobrepresión considerable que se sitúa alrededor de 100 a 150 atm [1].

c) Propiedades químicas y elección de materiales.

Se sabe que aunque se envaina el uranio metálico masivo, no se acepta utilizar este combustible, teniendo en cuenta el riesgo de ver el agua introducirse por una fisura y provocar la destrucción del elemento y la contaminación del circuito.

Prácticamente, ya que solo el uranio reviste interés, se encuentran principalmente dos tipos de combustibles:

1º *Los combustibles del tipo dispersado* (generalmente en forma de placa, de manera de ofrecer una superficie grande de intercambio).

- Aleaciones U-Zr o dispersión de óxido en el acero inoxidable, para los reactores de potencia.
- Aleaciones U-Al o dispersión del óxido en el aluminio, para los reactores de investigación a baja temperatura.

En ambos casos, debido a que hay poco uranio, es necesario un enriquecimiento muy elevado ($\sim$ 90 % para los reactores de potencia).

2º *El óxido UO_2* (Corrientemente utilizado en todos los reactores de agua liviana).

Este combustible es muy utilizado en los rectores de agua liviana debido a las propiedades que ya hemos precisado [2].

[1] Del lado secundario, la presión del vapor puede ser solo orden de 35 atm.

[2] Ver 6.2. del capítulo sobre los Materiales Nucleares.

- Inercia en el agua caliente.
- Muy buena estabilidad bajo irradiación.
- Temperatura de fusión muy elevada (pero débil conductibilidad térmica).

Por razones químicas, la elección de los *materiales de envainado* está limitada al circonio y a los aceros inoxidables.

12.1.2. *Agua pesada*

En los párrafos 2.2. y 2.3. del presente capítulo, hemos presentado un cierto número de puntos relativos al agua pesada. No los repetiremos aquí; sin embargo daremos algunas precisiones complementarias.

Los reactores que utilizan el agua pesada como moderador necesitan estudios neutrónicos importantes.

En particular se observa, después del examen del balance neutrónico [1], que la captura propia en el moderador es muy débil y al contrario, la de los materiales de envainado y de estructura es importante.

Sin embargo se encuentra, teniendo en cuenta los elementos relativos al paso de la red, ligado a la geometría del combustible (Barra o fracción de barra) que en general se tiene interés en aumentar la cantidad del agua pesada hasta una relación de moderación elevada.

La curva representativa de K efectivo en función con la cantidad del moderador, la cual al principio sube rápidamente, llega a ser después bastante plana, es decir que no se pierde mucho en reactividad al ubicarse encima del máximo; esto permite en compensación ganar en potencia volumétrica en el corazón, a una potencia específica dada.

La relación es a menudo la siguiente: $\dfrac{\text{peso } D_2O}{\text{peso } U} \sim Z$

El gran número de parámetros:

- Elección del metal o del óxido.
- Sección de U por canal.
- Forma del combustible.

[1] Efectuados sobre un reactor de tipo canadiense.

- Número de elementos en la grapa (o de placa, de tubos, etc.).
- Dimensión, disposición, tamaño de los elementos.
- Paso de la red.
- Características del refrigerante.
- Disposición y espesor de las estructuras.

que intervienen en este tipo de reactores, ha conducido a realizar estudios de la red muy sistemáticos, por experiencias críticas.

En estos tipos de reactores, la *utilización del uranio natural* es particularmente ventajosa (parte muy importante del plutonio en cuanto a energía suministrada).

Aquí la obtención de potencias específicas elevadas es necesaria. Las tasas de 10.000 MWd/t son citadas frecuentemente.

Problemas de materiales (se supone la refrigeración mediante agua pesada, con tubos de fuerza).

El combustible está formado en general por racimos de UO_2 con vaina de Zircalloy.

Señalemos que, con U metal, aún con 1 ó 2 % de Mo, no es posible actualmente garantir un régimen de combustión tan elevado como 10.000 MWd/t, accesible con el combustible UO_2.

El fraccionamiento de UO_2 es, evidentemente, una necesidad debido a su débil conductividad térmica, la cual es más o menos bien conocida.

En lo concerniente a la *temperatura de las vainas*, existen dos límites:

una *impuesta por la corrosión*, del orden de 325° C, en general no alcanzada.

la otra *impuesta por la condición de no ebullición*, en consecuencia, función de la presión.

Los cálculos económicos demostrarían que no se tiene interés en aumentar demasiado la presión ($\leq$ 80 b).

12.2. COMPORTAMIENTO DEL AGUA LIVIANA Y DEL AGUA PESADA EN LOS REACTORES

12.2.1. *Generalidades*

Haciendo abstracción de las cuestiones de orden económico (costo), y las de neutrónica, se puede admitir que las dos variedades isotópicas del agua tienen propiedades físico-químicas en conjunto muy próximas.

En relación con el inventario neutrónico, sabemos de cualquier manera, que en el caso del agua pesada se plantea un problema importante de mantenimiento del título isotópico.

En total, las degradaciones susceptibles de formarse en el seno del agua pesada o de la liviana, son:

- La radioactivación.
- La descomposición radiolítica.
- La contaminación por los materiales en contacto.
- y para el agua pesada solamente, la contaminación isotópica accidental.

12.2.2. *Radioactivación*

La radioactivación en cuestión, se refiere a los elementos componentes hidrógeno y oxígeno, y sus isótopos, que son susceptibles de ser activados por las radiaciones γ y los neutrones durante el funcionamiento del reactor.

Dado que en el agua pesada no hay prácticamente más que *deuterio* en lugar de hidrógeno, se forma así, durante su permanencia en el reactor cantidades importantes de *tritio T*, formación resultante de la reacción D (n, γ).

Debido a su período (12 años) ; la concentración de T en D_2O crece en forma lineal durante un largo período.

Ejemplo de activación:

Sea un flujo de 10^{13} n/cm^2 s; al cabo de un año de actividad debida al Tritio es del orden de $0{,}5 . 10^{-3}$ curies/cm^3 de agua; la actividad de saturación corresponde entonces a 0,01 curie/cm^3 de agua aproximadamente.

Teniendo en cuenta que la radiación β es muy débil (6 ke V), no existe ningún peligro de irradiación.

Si la presencia de T no origina ninguna dificultad en la explotación corriente de un reactor, es necesario por otra parte tomar ciertas medidas (ventilación, caretas, etc.) durante las operaciones de intervención sobre los circuitos de agua.

Respecto a la activación del oxígeno (sobre todo 16 O), las radiaciones resultantes son enérgicas y las protecciones se imponen (por ejemplo, condiciones de acceso en un punto del recorrido del agua, naturaleza de las juntas y conexiones de las tuberías).

Observaciones sobre las impurezas:

Una actividad muy importante puede originarse a raíz de ciertas impurezas:

Fe, Al, Cu, principalmente activadas bajo la influencia de los neutrones.

Si la influencia del Al activado decrece muy pronto al cabo de algunas horas de detención, la del Fe que tiene como descendiente un cobalto activo, será muy marcada y podrá resultar preponderante algunos días o algunas semanas después que el agua que lo contiene haya cesado de ser irradiada.

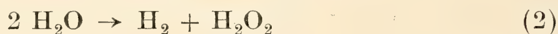
12.2.3. *Disociación radiolítica*

a) Aspecto teórico

Se admite generalmente que las reacciones supuestas:



$$H_2O \rightarrow H + OH \qquad (1)$$



$$2\ H_2O \rightarrow H_2 + H_2O_2 \qquad (2)$$

se producirían preferencialmente bajo el efecto:

- de las radiaciones de débil densidad de ionización para (1)
- de las radiaciones de fuerte densidad de ionización para (2)

Se dice que la reacción (1) es una *reacción de retrogradación,* pues ella se opone a la descomposición consumiendo los productos surgidos de la reacción (2).

Esta última reacción es llamada *reacción de descomposición*, pues la reacción (2) y las reacciones consecutivas conducen globalmente:

- a una *descomposición del agua*.

el hidrógeno directamente y el oxígeno formándose por dos reacciones sucesivas.

Se produce un equilibrio dinámico cuando las reacciones de descomposición y de retrogradación tienen velocidades iguales.

De la aplicación de las consideraciones técnicas a los tres tipos de reactores,

- heterogéneos
- homogéneo a solución
- homogéneo a suspensión

se retendrá solamente la concerniente al primer tipo.

Se notará solamente que la energía absorbida por radiólisis es bastante más importante en un reactor homogéneo que en un reactor heterogéneo.

b) Radiólisis en atmósfera renovada

Esta atmósfera se encuentra en los reactores no prensados, la superficie libre de agua pesada estando barrida por un *gas inerte que arrastra constantemente*[1] *los gases radiolíticos formados.*

Señalemos que en este caso, por interés en economizar, es necesario prever un método de recuperación, consistiendo el más simple en recombinar catalíticamente la mezcla de los gases D_eC (o H_2) y D_2.

El desprendimiento gaseoso es una función decreciente de la *pureza* del agua, que se tiene interés en mantener *lo más débil posible*.

[1] De lo contrario la acumulación, en la atmósfera del reactor, de una mezcla gaseosa D_2 (o H_2) y O_2 resultaría explosiva debajo de cierto límite (contenido en H_2 8 %, y poco diferente para D_2).

c) Radiólisis en atmósfera confinada

Es el caso de los reactores a presión, donde el agua es mantenida a una presión notablemente superior a su tensión de vapor a la temperatura de funcionamiento.

La experiencia con una ampolla sellada, irradiada, muestra que hay un tope de presión.

N. B.: La derivada en el origen no es sino, a constante elegida, que la velocidad de desprendimiento en atmósfera renovada.

Este límite es igualmente alcanzado por la *presión parcial* del gas girando en el reactor, presión que es:

función del contenido de impurezas en el agua.

Función decreciente de la temperatura (en consecuencia *temperatura relativamente elevada*).

Aún con el límite una vez alcanzado, ninguna descomposición radiolítica se produce, ninguna recombinación sería necesaria mientras la presión parcial del gas en la fase vapor existente eventualmente sea inferior al límite de explosión de la mezcla.

Pero, debido a los fenómenos de corrosión debidos al oxígeno presente en solución, este gas debe evitarse, razón por la cual la adición de *una presión parcial excedente de hidrógeno.*

Un reactor similar podrá estar desprovisto de circuito de recombinación.

12.2.4. *Contaminación*

El agua de un reactor puede ser contaminada por:

- La acumulación de productos de corrosión.
- La presencia de substancias extrañas (considerado como excepcional).
- Las reacciones sobre radiaciones.

La contaminación más importante resulta de la corrosión, cuya influencia puede manifestarse por:

- aceleración de la corrosión
- aumento de la velocidad de descomposición radiolítica del agua (sólo las impurezas iónicas intervienen en este fenómeno).
- disminución de la reactividad de la pila (efecto comparable al resultante de la disminución del título isotópico en el caso del agua pesada)
- radiactivación de las impurezas.

Por estas razones (y otras de menor importancia) se impone la realización de una *depuración continua del agua de los reactores*.

Se realiza a menudo mediante *resinas intercambiadoras de iones*, siguiendo una técnica severa de acuerdo a la importancia que se le atribuye al acentuado grado de pureza del agua.

12.2.5. *Mantenimiento de la pureza isotópica del agua pesada*

Las fuentes de contaminación isotópica del agua pesada pueden tener diversos orígenes:

a) el contacto agua pesada-vapor de agua atmosférico [1].

b) el contacto de un cierto número de materiales conteniendo hidrógeno es difícil de evitar (por ejemplo presencia de ciertas juntas de estanqueidad y sobre todo las de las resinas cambiadoras de iones del circuito de depuración).

c) introducción eventual de agua liviana en los circuitos de agua pesada a raóz de una fuga en el lado secundario por ejemplo.

Se subsana c) previendo para el funcionamiento normal la presión del agua pesada superior a la del comportamiento del agua liviana.

Caso b): el agua liviana inicialmente contenida en las resinas liberadas puede ser reemplazada por el agua pesada efectuando un barrido del lecho de resina mediante un "pistón", de agua pesada [2].

[1] Otra fuente análoga: puestaen contacto con el agua pesada con piezas metálicas previamente expuestas al aire húmedo, es decir reteniendo agua común absovida o combinada.

[2] Es la operación llamada *deuteración*.

Aun durante una deuteración juzgada perfecta, subsiste una ligera contaminación permanente, inherente a la presencia de resinas (hipótesis de la influencia de las radiaciones debido a las impurezas radioactivas absorbidas durante el funcionamiento del circuito de depuración).

Caso a)[2] el remedio es fácil, el agua pesada a superficie libre está siempre cubierta por una atmósfera de gas inerte (H_e) cuya presión puede ser ligeramente superior a la de la atmósfera.

N. B.: Se han puesto a punto aparatos de *medida continua* de la concentración isotópica.

Comisión de Redacción de los

ANALES DE LA SOCIEDAD CIENTIFICA ARGENTINA

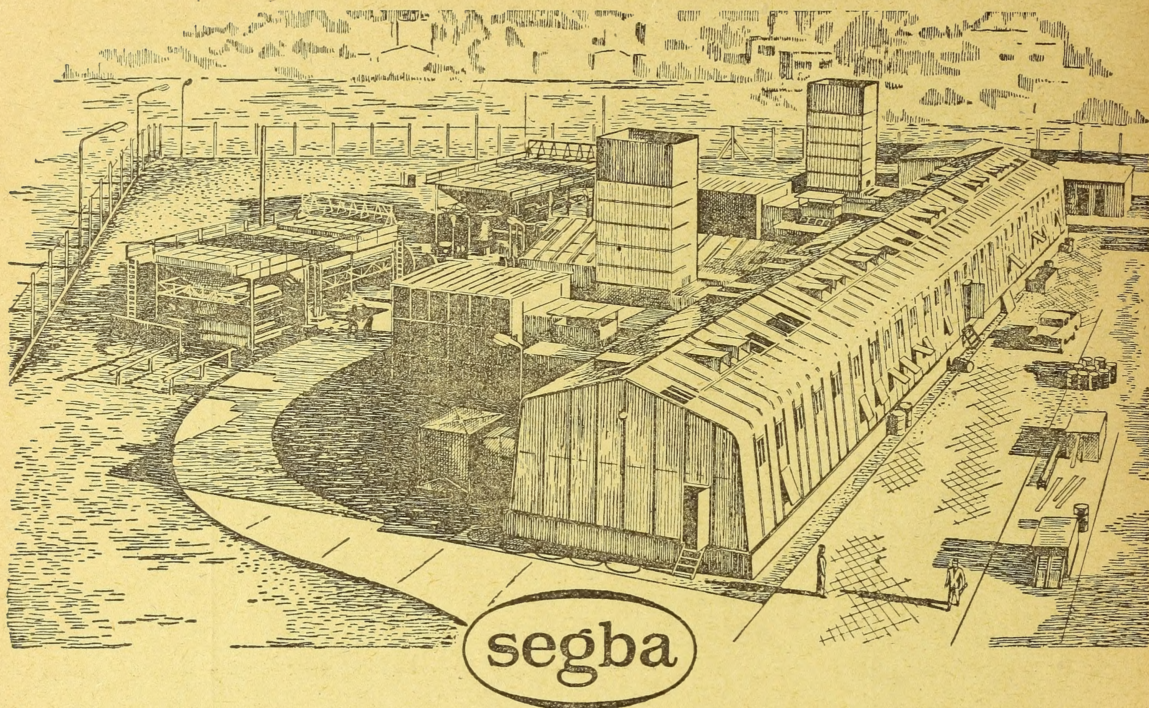
Ing. Agr. Arturo Burkart
Dr. Horacio H. Camacho
Ing. Roberto D. Cotta
Cap. de Fragata Luis M. de la Canal
Ing. Agr. Arturo E. Ragonese
Clmte. Rodolfo N. M. Panzarini
Ing. Agr. José A. Pastrana
Dr. Luis A. Santaló
Dr. Otto Schneider
Dr. Andrés O. M. Stoppani
Dr. Máximo Valentinuzzi
Dr. José Federico Westerkamp



Correo Argentino Central « B »

Franqueo pagado
Concesión Nº 1186

Tarifa reducida
Concesión Nº 6247



Las cinco centrales de punta ubicadas en Malaver, Remedios de Escalada, La Matanza, Gutiérrez y Berisso, con una potencia total instalada de 140.000 kW, significan un importante aporte a la red de distribución en las horas de máxima demanda de energía eléctrica.

SERVICIOS ELECTRICOS DEL GRAN BUENOS AIRES S. A.

